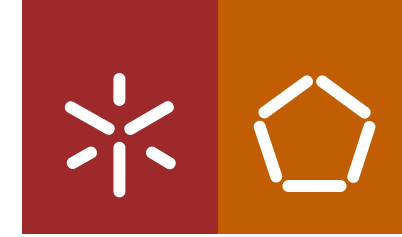




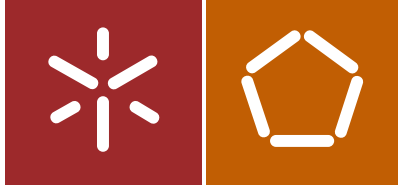
João Pedro Ferreira Torres

Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação do efeito de escala na rentabilidade das intervenções de reabilitação do edificado, com o objetivo nZEB

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Pedro Ferreira Torres

Desenvolvimento de uma metodologia para  
avaliação do efeito de escala na rentabilidade  
das intervenções de reabilitação do edificado,  
com o objetivo nZEB

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação de  
Professora Doutora Manuela Almeida  
Doutor Ricardo Barbosa

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### *Licença concedida aos utilizadores deste trabalho*

*[Caso o autor pretenda usar uma das licenças Creative Commons, deve escolher e deixar apenas um dos seguintes ícones e respetivo lettering e URL, eliminando o texto em itálico que se lhe segue. Contudo, é possível optar por outro tipo de licença, devendo, nesse caso, ser incluída a informação necessária adaptando devidamente esta minuta]*



Atribuição  
CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

*[Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original. É a licença mais flexível de todas as licenças disponíveis. É recomendada para maximizar a disseminação e uso dos materiais licenciados.]*



Atribuição-Compartilha Igual  
CC BY-SA

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

*[Esta licença permite que outros remisturem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações ao abrigo de termos idênticos. Esta licença costuma ser comparada com as licenças de software livre e de código aberto «copyleft». Todos os trabalhos novos baseados no seu terão a mesma licença, portanto quaisquer trabalhos derivados também permitirão o uso comercial. Esta é a licença usada pela Wikipédia e é recomendada para materiais que seriam beneficiados com a incorporação de conteúdos da Wikipédia e de outros projetos com licenciamento semelhante.]*



**Atribuição-SemDerivações**  
**CC BY-ND**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

*[Esta licença permite que outras pessoas usem o seu trabalho para qualquer fim, incluindo para fins comerciais. Contudo, o trabalho, na forma adaptada, não poderá ser partilhado com outras pessoas e têm que lhe ser atribuídos os devidos créditos.]*



**Atribuição-NãoComercial**  
**CC BY-NC**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

*[Esta licença permite que outros remisturem, adaptem e criem a partir do seu trabalho para fins não comerciais, e embora os novos trabalhos tenham de lhe atribuir o devido crédito e não possam ser usados para fins comerciais, eles não têm de licenciar esses trabalhos derivados ao abrigo dos mesmos termos.]*



**Atribuição-NãoComercial-CompartilhaGual**  
**CC BY-NC-SA**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

*[Esta licença permite que outros remisturem, adaptem e criem a partir do seu trabalho para fins não comerciais, desde que lhe atribuam a si o devido crédito e que licenciem as novas criações ao abrigo de termos idênticos.]*



**Atribuição-NãoComercial-SemDerivações**  
**CC BY-NC-ND**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

*[Esta é a mais restritiva das nossas seis licenças principais, só permitindo que outros façam download dos seus trabalhos e os compartilhem desde que lhe sejam atribuídos a si os devidos créditos, mas sem que possam alterá-los de nenhuma forma ou utilizá-los para fins comerciais.]*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, não podia deixar de agradecer aos meus pais por todo o apoio incondicional que me deram ao longo de todas as etapas da minha vida e por me incentivarem a nunca desistir dos meus objetivos.

Dedico também um agradecimento especial para toda a minha família, que me ajudaram em todos os momentos e que me receberam de sorriso na face e de braços abertos.

Um especial agradecimento para o Doutor Ricardo Barbosa e Professora Doutora Manuela Almeida pela paciência e orientação, fundamental para a realização desta dissertação.

À Maria João, um obrigado do fundo do meu coração por ter acreditado sempre nas minhas capacidades, pela paciência e por ter estado sempre do meu lado nos bons e maus momentos.

A todos os meus amigos, um obrigado, especialmente para aqueles que ao longo desta caminhada sempre me apoiaram e me incentivaram. Obrigado pela amizade pura e por todos os momentos especiais partilhados.

Por fim, tenho de agradecer ao Nelson Pinheiro por me ter auxiliado em algumas fases da minha dissertação e por ter disponibilizado alguns elementos essenciais para a sua elaboração.

## DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## RESUMO

Face ao elevado consumo de energia e emissão de gases com efeito de estufa do parque edificado, existe, como consequência, a necessidade de fomentar políticas que providenciem uma melhoria do desempenho energético do mesmo. Nesta perspetiva, a reabilitação de edifícios existentes e o aumento da eficiência energética dos mesmos é de uma importância fundamental para o alcance dos objetivos definidos em termos de desenvolvimento sustentável.

Em 2010, com a reformulação da *EPBD*, a Comissão Europeia tomou uma posição bastante exigente neste sentido, estabelecendo o conceito de edifícios de necessidades quase nulas de energia (*nZEB*), que se caracterizam como edifícios com elevado desempenho energético e baixas necessidades energéticas, suportadas por fontes de energia renovável, produzida preferencialmente no local.

Em termos de reabilitação energética de edifícios existentes, existem evidências de que uma intervenção ao nível de um grupo de edifícios pode trazer vantagens significativas do ponto de vista de combinação entre medidas de eficiência energética e fornecimento de energia renovável, para além da possibilidade de obtenção de economias de escala. Assim, o objetivo do desenvolvimento desta dissertação é a definição de uma metodologia para a avaliação do efeito de escala na rentabilidade de intervenções de reabilitação, com vista ao objetivo *nZEB*. Como objetivo adicional, a investigação pretende ainda a determinação de pacotes de soluções de reabilitação com o nível ótimo de rentabilidade à escala de bairro, com o intuito de aproveitar as potenciais sinergias entre as medidas a adotar nos diferentes cenários de reabilitação.

Com o propósito de pôr em prática a metodologia desenvolvida, foi selecionado um grupo de edifícios num contexto de habitação social como caso de estudo – O Bairro de Santa Tecla em Braga. O estudo realizou-se através da utilização de uma tipologia representativa (fração com maior representação no bairro) e posterior avaliação do seu desempenho energético e financeiro com o intuito de apoiar a transição para a escala de bairro.

Os resultados, decorrentes da aplicação da metodologia, sugerem que uma intervenção integrada, que contempla medidas de melhoria na envolvente, sistemas de climatização e fontes de energia renovável, é extremamente vantajosa e pode atingir valores interessantes de rentabilidade, em comparação com a intervenção de referência. Para uma perspetiva privada, com vista ao apoio de escolha de soluções, nos cálculos efetuados para a tipologia representativa desenvolvida para este estudo, a intervenção que



contempla uma solução ETICS com EPS de 60 mm, vão envidraçado duplo com caixilharia de PVC e o conjunto de Sistemas S3 (bomba de calor) é a solução de custo ótimo. Quando se considera uma intervenção no grupo de edifícios, os cálculos sugerem que a solução de custo ótimo é a mesma solução de envolvente e envidraçados com o sistema S3, verificando-se que a intervenção ao nível do grupo de edifícios permitiu uma redução de custos globais de cerca de 46% devido à alteração de sistemas técnicos e consequente diminuição nas quantidades dos mesmos, e ainda às economias de escala conseguidas pela compra de elevadas quantidades de materiais utilizados em soluções de paredes exteriores e de vãos envidraçados.

**PALAVRAS-CHAVE:** NZEB; Grupo de Edifícios; Reabilitação Energética; Custo Ótimo; Eficiência Energética; Energias Renováveis

## ABSTRACT

In view of the high energy consumption and greenhouse gas emissions of the existing buildings stock, there is, as consequence, the need to promote policies that provide an improvement of their energy performance. In this perspective, the retrofitting of existing buildings and the increase of their energy efficiency are of fundamental importance for achieving the objectives defined in terms of sustainable development.

In 2010, with the EPBD recast, the European Commission took a very demanding position in this regard, establishing the concept of nearly zero-energy buildings (nZEB), which are characterized as buildings with high energy performance and low energy needs, sustained by renewable energy sources, preferably produced on site or nearby.

In terms of energy retrofitting of existing buildings, there is evidence that an intervention at the group of buildings level can bring significant advantages from the point of view of a combination between energy efficiency measures and renewable energy supply, in addition to the possibility of obtaining economies of scale. Thus, the objective of the development of this dissertation is the definition of a methodology for the assessment of the scale effect on the retrofitting interventions cost-effectiveness, towards the nZEB objective. As an additional objective, the research also aims to determine the cost-optimal packages of renovation solutions at the neighbourhood level, in order to take advantage of the potential synergies between the measures to be adopted in the different retrofitting scenarios.

With regard to the development of the methodology, a group of buildings was selected in the context of a social housing as a case study - The Neighbourhood of Santa Tecla in Braga. The study was carried out through the use of a representative typology (building unit with most representation in the neighbourhood) and subsequent evaluation of its energy and financial performance in order to support the transition to the group of buildings level.

The results, arising from the application of the methodology, suggest that an integrated intervention that includes retrofitting measures in the envelope, air conditioning systems and renewable energy sources is extremely advantageous and cost-effective when compared to the reference intervention. For a private perspective, in order to support the selection of solutions, in the calculations made for the representative typology developed for this study, the intervention that contemplates an ETICS solution with EPS of 60 mm, double glazed windows with PVC frames and the set of S3 systems (heat pump) is the cost-optimal

solution. When considering an intervention in the group of buildings, the calculations suggest that the cost-optimal solution is the same envelope and window solution with the S3 system, verifying that the intervention at the group of buildings level allowed a reduction of global costs of around 46% due to the alteration of technical systems and consequent decrease in their quantities, and also to the economies of scale provided by the purchase of high quantity of materials used in solutions of exterior walls and windows.

**KEYWORDS:** NZEB; Group of Buildings; Energy Retrofitting; Optimal Cost; Energy Efficiency; Renewable Energies

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Estrutura da Dissertação .....	3
2. ESTADO DA ARTE .....	5
2.1 Influência dos edifícios no desenvolvimento sustentável .....	5
2.2 Eficiência energética nos edifícios .....	6
2.2.1 Eficiência energética em edifícios novos .....	9
2.2.2 Relevância da eficiência energética na neutralidade carbónica - <i>nZEB</i> .....	9
2.3 Reabilitação energética .....	10
2.3.1 Implementação de medidas de reabilitação nos edifícios .....	15
2.3.1.1 Soluções passivas .....	16
2.3.1.1.1 Paredes exteriores .....	18
2.3.1.1.2 Vãos envidraçados .....	21
2.3.1.2 Soluções Ativas .....	24
2.3.1.2.1 Bombas de calor .....	25
2.3.1.2.2 Caldeiras .....	25
2.3.1.2.3 Ar condicionado .....	26
2.3.1.2.4 Energias renováveis .....	27
2.4 Metodologias de avaliação de desempenho energético .....	34
2.4.1 Métodos de avaliação .....	34
2.4.2 Avaliação de desempenho energético à escala urbana .....	35
3. METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ESCALA NA RENTABILIDADE DAS INTERVENÇÕES DE REABILITAÇÃO DO EDIFICADO, COM O OBJETIVO NZEB .....	40

3.1	Definição e análise da metodologia para avaliação do efeito de escala na rentabilidade de intervenções de reabilitação .....	40
3.1.1	Levantamento e caracterização dos edifícios .....	42
3.1.2	Definição da tipologia representativa .....	43
3.1.3	Avaliação do desempenho energético do edifício existente .....	43
3.1.4	Escolha das medidas de melhoria .....	46
3.1.5	Rentabilidade.....	47
3.1.6	Alteração de pressupostos para grupo de edifícios.....	50
4.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DEFINIDA AO CASO DE ESTUDO .....	51
4.1	Levantamento e caracterização dos edifícios .....	51
4.2	Definição da tipologia representativa .....	54
4.3	Avaliação do desempenho energético do edifício existente .....	56
4.4	Escolha das medidas de melhoria .....	57
4.5	Rentabilidade.....	63
4.5.1	Extrapolação dos resultados para o grupo de edifícios .....	70
5.	CONCLUSÕES .....	81
5.1	Conclusão .....	81
5.2	Trabalhos futuros.....	83
	ANEXOS .....	96
	Anexo I – Tabela de comparação de metodologias .....	97
	Anexo II – Nível de rentabilidade .....	99
	Anexo II.1 – Medidas de melhoria isoladas.....	99
	Anexo II.2 – Pacotes de reabilitação (tipologia representativa).....	100
	Anexo II.3 - Pacotes de reabilitação (grupo de edifícios) .....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de solução com aplicação de isolamento térmico pelo exterior .....	18
Figura 2 - Camadas constituintes do sistema ETICS .....	20
Figura 3 - Camadas constituintes de Fachada Ventilada .....	21
Figura 4 - Ganhos de calor numa habitação .....	21
Figura 5 - Orientação solar no Verão para o hemisfério Norte (a); Orientação solar no Inverno para o hemisfério Norte (b).....	23
Figura 6 - Exemplo de dispositivo de proteção solar exterior (a); Exemplo de dispositivo de proteção solar interior (b) .....	23
Figura 7 - Exemplo de bomba de calor para produção de água quente .....	25
Figura 8 - Exemplo de caldeira de condensação a gás mural .....	26
Figura 9 - Exemplo de sistema multi-split .....	27
Figura 10 - Sistema "on-grid" com integração de painéis fotovoltaicos (a); Painéis fotovoltaicos (b) ....	28
Figura 11 - Central solar térmica.....	29
Figura 12 - Coletor solar plano com sistema de termossifão .....	30
Figura 13 - Esquema de produção de energia de biomassa .....	31
Figura 14 - Parque eólico.....	32
Figura 15 - Barragem do Alto – Lindoso .....	32
Figura 16 - Central geotérmica da Ribeira Grande .....	33
Figura 17 - Estrutura da metodologia .....	41
Figura 18 - PVGIS (a); SCE.ER (b) .....	46
Figura 19 - Gráfico genérico de resultados de análise de custo-ótimo.....	49
Figura 20 - Distribuição dos blocos habitacionais do bairro de Santa Tecla .....	51
Figura 21 - Fotografias exteriores do Bairro de Santa Tecla.....	54
Figura 22 - Planta da tipologia representativa .....	55
Figura 23 - Nível de rentabilidade das medidas de melhoria isoladas, numa perspetiva privada.....	64
Figura 24 - Nível de rentabilidade das medidas de melhoria isoladas, numa perspetiva privada.....	65
Figura 25 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação, numa perspetiva privada (tipologia representativa) .....	68

Figura 26 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação, numa perspetiva social (tipologia representativa) .....	69
Figura 27 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação, numa perspetiva privada (grupo de edifícios).....	75
Figura 28 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação, numa perspetiva social (grupo de edifícios) .....	76
Figura 29 - Nível de rentabilidade numa perspetiva privada (Tipologia representativa e grupo de edifícios) .....	78
Figura 30 - Nível de rentabilidade numa perspetiva social (Tipologia representativa e grupo de edifícios) .....	79

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Estado de conservação do parque edificado por época de construção .....	11
Tabela 2 - Relação entre os valores das necessidades nominais e limite, de energia útil para aquecimento, arrefecimento e energia primária de edifícios sujeitos a grandes intervenções.....	14
Tabela 3 - Tipos de isolantes térmicos e suas vantagens .....	17
Tabela 4 - Comparação entre isolamento térmico pelo exterior e isolamento térmico pelo interior .....	19
Tabela 5 – Excerto da tabela resumo com comparação de metodologias através do tipo de abordagem implementado .....	37
Tabela 6 – Excerto da tabela de identificação de parâmetros de comparação entre os tipos de modelos .....	39
Tabela 7 - Características dos blocos habitacionais .....	52
Tabela 8 - Descrição e caracterização térmica dos elementos construtivos .....	53
Tabela 9 - Descrição de sistemas técnicos padrão adotados no REH .....	53
Tabela 10 - Tabela de análise de frações existentes.....	55
Tabela 11 - Análise dimensional da tipologia representativa.....	56
Tabela 12 - Tabela de cálculo das necessidades nominais anuais globais de energia primária da intervenção de referência.....	57
Tabela 13 - Medidas de melhoria para paredes exteriores (ETICS) .....	58
Tabela 14 - Medidas de melhoria para paredes exteriores (Fachada Ventilada) .....	58
Tabela 15 - Seleção da condutibilidade térmica do tijolo furado .....	60
Tabela 16 - Medidas de melhoria para vãos envidraçados .....	60
Tabela 17 - Valor do coeficiente de transmissão térmica linear relativo à ligação entre o caixilho e o vidro .....	62
Tabela 18 - Soluções de melhoria de sistemas técnicos.....	63
Tabela 19 - Soluções de melhoria da envolvente exterior (tipologia representativa).....	67
Tabela 20 - Soluções de melhoria da envolvente exterior (grupo de edifícios) .....	71
Tabela 21 - Quantidade de sistemas técnicos.....	72
Tabela 22 - Tabela resumo com comparação de metodologias através do tipo de abordagem implementado .....	97
Tabela 23 – Nível de rentabilidade das medidas de melhoria isoladas .....	99



Tabela 24 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação (tipologia representativa) .....	100
Tabela 25 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação (grupo de edifícios).....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ACE – Aglomerado de cortiça natural expandida

ADENE – Agência para a Energia

$A_f$  – Área de caixilho

$A_g$  – Área do vidro

$A_i$  – Área dos elementos que separam o interior do ENU

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

APFAC – Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e *ETICS*

AQS – Águas quentes sanitárias

$A_u$  – Área dos elementos que separam o exterior do ENU

btr – Coeficiente de redução de perdas

c – Fator de conversão

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

*COP* – Coeficiente de desempenho (*Coefficient of Performance*)

*EED* – Diretiva relativa à eficiência energética (*Energy Efficiency Directive*)

*EER* – Rácio de eficiência energética (*Energy Efficiency Ratio*)

ENU – Espaço não útil

EPAL – Empresa Portuguesa das Águas Livres

*EPBD* – Diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios (*Energy Performance of Buildings Directive*)

EPS – Poliestireno expandido

*ETICS* – Sistema composto de isolamento térmico exterior (*External Thermal Insulation Composite System*)

*EU* – União Europeia (*European Union*)

GIS – Sistema de Informação Geográfica (*Geographic Information System*)

$g_{Tvc}$  – Fator solar do vão envidraçado com um dispositivo de proteção

$g_{\perp, T}$  – Fator solar global do vão com todos os dispositivos de proteção solar totalmente ativados

$g_{\perp, Tp}$  – Fator solar global do vão com todos os dispositivos de proteção solar permanentes totalmente ativados

$g_{\perp, vi}$  – Fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao vão

IEA – Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*)

INE – Instituto Nacional de Estatística

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

IPQ – Instituto Português da Qualidade

ISO – Organização Internacional para Padronização (*International Organization for Standardization*)

ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade

$l_g$  – Perímetro de ligação entre o caixilho e o vidro

LM – Lã mineral

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Nac – Necessidades nominais anuais de energia útil para preparação de água quente sanitária

Nic – Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento

Ntc – Necessidades nominais anuais globais de energia primária

Nvc – Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento

*nZEB* – Edifícios com necessidades quase nulas de energia (*Nearly zero-energy buildings*)

PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

PUR – Espuma de poliuretano

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RECS – Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

REH – Regulamento de Desempenho Energéticos dos Edifícios de Habitação

Rph – Taxa de renovação do ar

R<sub>se</sub> – Resistência térmica superficial exterior

R<sub>si</sub> – Resistência térmica superficial interior

SCE – Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

U – Coeficiente de transmissão térmica

U<sub>f</sub> – Coeficiente de transmissão térmica do caixilho

U<sub>g</sub> – Coeficiente de transmissão térmica do vidro

UNCED – Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (*United Nations Conference on Environment and Development*)

UNDESA – Departamento de Assuntos Económicos e Sociais das Nações Unidas (*United Nations Department of Economic and Social Affairs*)

UNEP – Programas das Nações Unidas para o Meio Ambiente (*United Nations Environment Programme*)

U<sub>w</sub> – Coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado

U<sub>wdn</sub> – Coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite do vão envidraçado

XPS – Poliestireno extrudido

ZEB – Edifícios com necessidades nulas de energia (*Zero-energy buildings*)

ψ<sub>g</sub> – Coeficiente de transmissão térmica linear relativo à ligação entre o caixilho e o vidro

η – Eficiência dos equipamentos



## 1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo a apresentação do enquadramento e motivação inerente ao tema.

### 1.1 Enquadramento

A partir do início da década de 70 do séc. XX surgiu uma certa preocupação em consequência do consumo excessivo de energia e do uso de recursos naturais que apenas agravava as condições climáticas do planeta. Diante dessas condições, em 1980, surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável, incorporado no Relatório *Brundtland* ou “Nosso Futuro Comum”, que visava continuar a satisfazer as necessidades da população atual e simultaneamente, pôr um travão nas ações prejudiciais para o ambiente (Brundtland, 1987). Em 1992, com a formação da Agenda 21, o conceito de desenvolvimento sustentável passou a focar-se não só no impacto ambiental, mas também nas dimensões sociais e económicas (UNCED, 1992).

O setor da construção e os edifícios em particular têm uma responsabilidade significativa a nível global no que toca ao consumo de energia e emissões associadas (Groezinger et al., 2014). Reconhecendo o problema na Europa, a Comissão Europeia tem vindo a dar ênfase a esta questão em regulamentação e definição de políticas, de modo a dar resposta às metas energéticas implementadas, que desafiam os Estados Membros da União Europeia a aumentar em 20% a eficiência energética e o contributo da energia proveniente de fontes renováveis e a reduzir em 20% as emissões de carbono, até 2020 (European Commission, 2011). Nesse sentido, publicou a Diretiva para o Desempenho Energético dos Edifícios, *EPBD* (European Commission, 2002), que levou a uma maior harmonização dos regulamentos nacionais para o desempenho térmico e energético de edifícios.

Em 2010, com a revisão da *EPBD* (European Commission, 2010), a Comissão Europeia tomou uma posição bastante mais exigente e estabeleceu o conceito de edifícios de necessidades quase nulas de energia (*nZEB*), com ênfase nos edifícios novos construídos a partir de 2020, e propõe a definição de

requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios baseados na metodologia de custo ótimo. Os edifícios *nZEB* são caracterizados por uma elevada eficiência energética aliada ao recurso a fontes de energias renováveis que devem ser produzidas no próprio edifício ou nas proximidades. De maneira a generalizar a implementação do conceito de *nZEB*, a revisão da *EPBD* de 2010 responsabilizou os Estados Membros da União Europeia pela elaboração dos seus próprios planos nacionais, com vista à promoção dos edifícios com necessidades quase nulas de energia (European Commission, 2010). No sentido de suplementar a reformulação da diretiva, foi publicado um documento com orientações para a obtenção de níveis de custo ótimo e para a definição de requisitos mínimos a nível nacional – O Regulamento Delegado 244/2012 (European Commission, 2012b).

A reabilitação de edifícios, nos dias de hoje, é um tema de elevado interesse por parte da sociedade em geral. Em Portugal, este tipo de intervenção possui um papel de elevada relevância no setor da construção, graças à eminente necessidade de reparação de uma percentagem considerável de edifícios (INE, 2012). Neste contexto, surge uma oportunidade para a implementação do conceito *nZEB* nos edifícios existentes. De forma a atingir o objetivo de edifícios existentes *nZEB*, deve ser promovida uma combinação de medidas de melhoria da envolvente do edifício e da substituição de equipamentos obsoletos por equipamentos com elevada eficiência energética, juntamente com a implementação de sistemas de produção de energia renovável (Almeida, Ferreira, & Rodrigues, 2013).

No sentido de definir quais as soluções de reabilitação a implementar, surge o nível ótimo de rentabilidade, definido como o *“nível de desempenho energético que leva ao mais baixo custo ao longo do ciclo de vida económico estimado”* (European Commission, 2012a). Esta questão tem vindo a ser investigada ao nível do edifício (Dalla Mora, Peron, Romagnoni, Almeida, & Ferreira, 2018; Almeida, Ferreira, & Rodrigues, 2014; Almeida & Ferreira, 2017). Em comparação, os estudos relativos a grupos de edifícios são mais escassos e restringidos a determinadas localizações geográficas (e.g.(Paiho, Abdurafikov, & Hoang, 2015)). Independentemente da falta de estudos associados à transição para a escala de grupos de edifícios, importa esclarecer que tal alteração poderá suscitar certas vantagens, tais como a promoção de efeitos de escala e de sinergias impostas pela combinação de medidas de eficiência energética e de sistemas baseados em fontes de energia renovável (Almeida & Barbosa, 2018).

Esta dissertação pretende contribuir para este tema, na medida em que almeja apoiar a adaptação da metodologia de custo ótimo para a escala de bairro ou grupo de edifícios, assim como ajudar a estabelecer combinações de estratégias de reabilitação com níveis de rentabilidade ótima, incluindo medidas de implementação de fontes de energia renovável, a serem utilizadas num grupo de edifícios,

de modo a tentar incentivar legisladores, companhias comercializadoras de energia, proprietários de edifícios com eficiência energética reduzida e investidores a aplicarem as medidas mencionadas (IEA Annex 75, 2018).

## 1.2 Objetivos

O desenvolvimento desta dissertação tem como finalidade a definição de uma metodologia para a avaliação do efeito de escala na otimização da reabilitação para a melhoria do desempenho energético de edifícios existentes, com vista ao objetivo nZEB. Para esse efeito, pretende-se proceder à adaptação, para um nível que permita avaliar um grupo de edifícios, de uma metodologia desenvolvida ao nível do edifício para a avaliação da rentabilidade de intervenções de reabilitação energética. Como objetivo adicional, a investigação pretende ainda a determinação de pacotes de soluções de reabilitação com o nível ótimo de rentabilidade à escala do grupo de edifícios, com o intuito de aproveitar as potenciais sinergias entre as medidas a adotar nos diferentes cenários de reabilitação.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos.

No capítulo 1 é realizada uma introdução ao tema, descrevendo o ambiente em que está inserido. São retratados, de igual forma, os objetivos e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é apresentada uma análise criteriosa de conceitos teóricos relacionados com o âmbito da dissertação, onde são abordados temas como o desenvolvimento sustentável, a importância da eficiência energética dos edifícios, a reabilitação energética e possíveis soluções construtivas e a integração de sistemas de aproveitamento de fontes de energia renovável e não renovável para a implementação dos *nZEB* e para a determinação de pacotes de melhoria com nível ótimo de rentabilidade. Ainda neste capítulo, é realizada uma pesquisa de estudos de avaliação do desempenho energético de um grupo de edifícios, no sentido de selecionar uma metodologia capaz de ser adaptada para as necessidades e requisitos impostos pela dissertação.

No capítulo 3 é definida a metodologia para a reabilitação a custos otimizados de um conjunto de edifícios, onde, inicialmente são definidas e explicadas as fases de desenvolvimento desta metodologia.



Posteriormente, o caso de estudo é apresentado e é realizada uma descrição dos elementos construtivos, em termos de constituição e de caracterização térmica. Por fim, a metodologia é aplicada ao caso de estudo selecionado.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia ao caso de estudo, incluindo a comparação entre os resultados para a tipologia representativa e os do grupo de edifícios. Ainda neste capítulo, são determinados os cenários de reabilitação com melhor nível de rentabilidade, assim como a solução de custo-ótimo, quando executada a intervenção para o grupo de edifícios.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais, de acordo com os resultados alcançados no capítulo 4.

## 2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é efetuada a revisão bibliográfica, onde se abordam os temas alusivos à dissertação. Esta revisão de bibliografia começa com uma análise de conceitos mais abrangentes e vai-se aprofundando com o desenrolar do capítulo, passando a abordar temas mais específicos.

Em suma, são apresentados conceitos relacionados com o desenvolvimento sustentável, a importância da eficiência energética dos edifícios, a reabilitação energética e possíveis soluções construtivas e a integração de sistemas de aproveitamento de fontes de energia renovável e não renovável para a implementação dos *nZEB* e para a determinação de pacotes de melhoria com nível ótimo de rentabilidade. Ainda neste capítulo, é realizada uma pesquisa de estudos de avaliação do desempenho energético de um grupo de edifícios, no sentido de selecionar uma metodologia capaz de ser adaptada para as necessidades e requisitos impostos pela dissertação.

### 2.1 Influência dos edifícios no desenvolvimento sustentável

Desde a década de 70 que começaram a surgir preocupações em relação à sustentabilidade do Planeta Terra, graças à utilização exagerada dos recursos naturais e aos impactos ambientais já existentes (UNDESA, 2017). Com a ocorrência de várias conferências a nível mundial, sentiu-se urgência na implementação de medidas que auxiliassem na mudança dos princípios morais e na maior conservação ambiental do planeta.

O conceito de desenvolvimento sustentável surge em 1980, desenvolvido pela União Mundial para a Natureza, cuja definição se entende pelo “desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazerem as suas próprias necessidades”. Em 1987, data de conceção do Relatório Brundtland ou “Nosso Futuro Comum”, o conceito de desenvolvimento sustentável tinha como principal preocupação o impacto ambiental (Brundtland, 1987). Contudo, com o aparecimento da Agenda 21, resultado da Conferência das Nações Unidas sobre o

Ambiente e Desenvolvimento, em 1992, o conceito de desenvolvimento sustentável passou a focar-se não só no impacto ambiental, mas também em fatores relacionados com problemas sociais e económicos. O desenvolvimento sustentável começou então a ser suportado por estes três pilares (UNCED, 1992).

Após a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente e Desenvolvimento, realizaram-se duas conferências e cimeiras de grande relevância, a Conferência de Quioto em 1997 (United Nations, 1998) e a Cimeira da Terra sobre Desenvolvimento Sustentável em 2002 (United Nations, 2002). Nas conferências e cimeiras anteriormente referidas, debateram-se diversos assuntos relacionados com as três dimensões do desenvolvimento sustentável, assim como a existência de uma maior interligação entre estas e a criação de novas metas para o futuro e políticas ou normas.

O setor da construção é uma parte fundamental para o desenvolvimento sustentável, visto que este interfere diretamente com o meio ambiente através do consumo de recursos que o integram, afetando a vida da população em vários aspetos. A nível global, o parque edificado, para além de utilizar cerca de 40% da energia final total consumida, também é responsável por um terço das emissões de gases com efeito de estufa (Mardiana & Sb, 2015). Este setor é também responsável pela utilização de mais de um terço dos recursos disponíveis e pela contribuição na criação de resíduos sólidos em 40% (UNEP, 2011).

## 2.2 Eficiência energética nos edifícios

O conceito de eficiência energética é um tema de debate com influência crescente por todo o mundo, devido à sua importância no combate ao elevado consumo de energia. A produção de energia está historicamente ligada aos combustíveis fósseis e ao agravamento das emissões de gases com efeito de estufa decorrentes desse processo (Pinheiro, 2006). Torna-se assim imperativo que o uso de energia num sector tão significativo como o dos edifícios seja o mais reduzido possível e que a sua utilização seja eficiente.

No setor da construção, mais concretamente nos edifícios residenciais, a energia proporciona aos utentes, a possibilidade de realizarem as suas atividades básicas no dia a dia. A energia, após produzida, pode ser convertida para distintas finalidades, sendo que as mais influentes em termos de consumo energético, em países europeus, são (Laustsen, 2008):

1. Climatização dos espaços;

2. Eletrodomésticos;
3. Água quente sanitária;
4. Iluminação;
5. Cozinhar.

A eficiência energética possui uma enorme relevância em diversos aspetos sociais, económicos e ambientais, pois, quanto maior for a eficiência energética menores são as perdas de energia no momento da sua utilização e por isso, o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub> serão muito menores, contribuindo para menores custos de utilização de energia e para o progresso da independência energética (Erbach, 2015).

O setor da construção, por ser um dos grandes consumidores de energia e por ter um grande potencial em termos de poupança de energia, é um foco para as medidas que têm vindo a ser desenvolvidas pela Comissão Europeia, no sentido de fomentar a melhoria da eficiência energética nos edifícios de habitação, de serviço, comerciais e industriais (Cardoso, 2011). Este estímulo de incremento da eficiência energética promove vantagens não só para o utilizador do edifício, mas também para toda a sociedade em geral, pois para além de promover a preservação do ambiente e a redução de utilização de combustíveis fósseis, também auxilia na mitigação da dependência energética, na criação de empregos, na melhoria das condições de saúde da população, na situação económica dos países, entre outros aspetos (Laustsen, 2008).

A Comissão Europeia, em 2002, lançou a primeira diretiva relativa à melhoria do desempenho energético dos edifícios. Esta foi elaborada com o intuito de definir uma metodologia de cálculo e requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios. Adicionalmente, foi concebido o sistema de certificação energética, no sentido de informar potenciais compradores ou arrendatários do nível de desempenho energético do edifício (European Commission, 2002).

Com a reformulação da *EPBD*, em 2010, a Comissão Europeia apresentou o conceito de *nZEB* e introduziu o conceito de níveis de custo ótimo (European Commission, 2010). Para além disso, introduziu nos Estados-Membros a responsabilidade de criar um plano nacional, para alcançar os objetivos propostos para 2020.

Ao se constatar que os objetivos propostos para 2020 não estavam a ser cumpridos pelos Estados-Membros (Cardoso, 2011), a Comissão Europeia decidiu lançar um guia, alertando para a importância da implementação de um plano nacional para a eficiência energética, elaborado por cada um dos

Estados-Membros. Nestes planos, devem ser definidos pacotes de medidas de eficiência energética para os edifícios, tendo por base as fontes de energia renovável. Recomenda-se também a utilização de pacotes de medidas ao invés de medidas isoladas, pelos efeitos sinérgicos que podem ser alcançados pela combinação de medidas (European Commission, 2013).

Em 2012, a Comissão Europeia publicou a diretiva 2012/27/EU, que visa tratar todos os assuntos relacionados com a eficiência energética. Segundo o que consta na diretiva, a eficiência energética é um instrumento fundamental no combate à dependência de energia importada, escassez de recursos energéticos, alterações climáticas e crise económica (Comissão Europeia, 2012). O desenvolvimento para uma economia mais eficiente a nível energético, possibilitará a divulgação de sistemas ou equipamentos mais inovadores e assim, incitar a uma maior competitividade industrial e à criação de mais postos de trabalho correlacionados com este tema (IEA, 2014a).

Sobre pressão de apresentar resultados a nível de eficiência energética pela Comissão Europeia, foi criado o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE). O terceiro e atual PNAEE, retrata as medidas de eficiência energética no contexto nacional e apresenta os resultados obtidos pelos planos anteriormente elaborados. Para além dos objetivos anunciados pela Comissão Europeia para cada um Estados-Membros, Portugal decidiu elevar a fasquia e estabelecer uma meta que incide na redução total de consumo da energia primária em 25% até 2020 (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2017).

No âmbito do cumprimento das metas estabelecidas, foram propostas metas anuais, recorrendo ao reforço das condições de mercado através de (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2017):

1. “Criação de “Acordo para a Energia Local (2017 – 2020)”, reunindo as Autarquias (Municípios e Freguesias) numa estratégia conjunta no sentido de garantir o compromisso em reduzir anualmente 1,5% do consumo de energia final do edificado da Administração Pública Local”;
2. “Alargar a promoção da eficiência energética de forma ativa sobre as instalações abrangidas pelo regime do comércio europeu de licenças de emissão previsto no Decreto-Lei n.º 93/2010, de 27 de julho e no Decreto-Lei n.º 38/2013, de 15 de março, através da obrigatoriedade de reporte de redução de consumo de energia final de 1,5%”.

### 2.2.1 Eficiência energética em edifícios novos

Os edifícios novos têm uma grande influência na eficiência energética, visto que os edifícios são planeados e construídos para durarem várias décadas. Se eventualmente, ao longo da fase de planeamento, forem adotadas medidas desapropriadas ou se os processos de construção não forem executados de uma forma cautelosa e precisa, pode-se potencializar um aumento do consumo energético e, portanto, um aumento dos custos de operação e emissões de carbono (Laustsen, 2008).

Os custos poderão aumentar não só graças ao maior consumo de energia, mas também em virtude de uma possível intervenção de reabilitação, que usualmente só ocorre após algumas décadas de utilização, caso não seja possível solucionar qualquer tipo de patologia através de uma intervenção de menor dimensão (Laustsen, 2008).

### 2.2.2 Relevância da eficiência energética na neutralidade carbónica - *nZEB*

Um ponto de extrema relevância no plano nacional de cada Estado-Membro é a definição dos edifícios de necessidades quase nulas de energia e do desenvolvimento de uma metodologia capaz de avaliar o desempenho energético dos edifícios. O conceito de *nZEB* ou *nearly zero-energy building*, é definido a nível europeu, pela *EPBD*, como “um edifício com um desempenho energético muito elevado. As necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades” (European Commission, 2010). Não obstante a elaboração desta definição, cada um dos Estados-Membros deve adotar e implementar uma definição de *nZEB* própria, visto que cada país tem as suas necessidades e condições específicas (European Commission, 2010).

Para melhor entender os desafios impostos é necessário compreender os conceitos *ZEB* e *nZEB*. O conceito de *ZEB* ou *zero-energy building* entende-se como um edifício autónomo em termos de produção de energia, com um balanço energético nulo e sem emissões de gases com efeito de estufa, e para isso integra fontes de energia renovável, instaladas dentro dos limites do edifício, capazes de gerar energia suficiente para suprir todas as suas necessidades energéticas (Cao, Dai, & Liu, 2016). Embora esta seja a solução mais eficiente a nível de desempenho energético e de redução de emissões de CO<sub>2</sub>, torna-se, por norma, inexequível, em virtude do elevado investimento inicial necessário. O conceito de *nZEB* foi

criado com o intuito de suavizar a transição dos requisitos impostos pelos *ZEB*, possibilitando que cada um dos Estados-Membros definam metas mais realísticas e acessíveis de alcançar num futuro próximo (Hernandez & Kenny, 2010).

As medidas de eficiência energética que impulsionam o elevado desempenho energético de um edifício com necessidades quase nulas de energia, devem ser definidas de acordo com critérios de rentabilidade económica e por isso, a transição de um edifício tradicional para *nZEB* requer que seja utilizado o quadro metodológico comparativo, exposto na reformulação da *EPBD* (European Commission, 2012a). Neste mesmo quadro são dadas orientações para a obtenção dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético extensíveis aos edifícios e aos seus componentes, assim como para a implementação de medidas de melhoria ao nível da envolvente e para a incorporação de equipamentos com elevada eficiência energética e fontes de energia renovável, tendo em consideração as restrições económicas e climáticas referentes a cada país. Apesar de o elevado desempenho energético ser um fator de enorme relevância na obtenção de edifícios *nZEB*, é imprescindível que seja realizada uma análise económica, com recurso à metodologia de custo ótimo, no sentido de promover um equilíbrio entre o consumo de energia e os custos globais da intervenção em causa (Cao et al., 2016; Almeida et al., 2016).

## 2.3 Reabilitação energética

A reabilitação energética tem como objetivo reparar ou substituir elementos de construção danificados, substituir equipamentos e sistemas, que ao passar dos anos se tornaram obsoletos, atendendo às necessidades atuais de conforto e eficiência energética, que cada vez são mais exigentes. Resumidamente, a reabilitação de edifícios pretende devolver as funcionalidades que o edifício tinha quando era novo, mas com as exigências pretendidas para o tempo presente da intervenção (Laustsen, 2008).

A reabilitação de edifícios é um tema com um incremento de interesse crescente para toda a sociedade em geral. Segundo o INE (2012), de 2001 para 2011, a percentagem de edifícios com necessidades de reparação diminuiu de 37.95% para 27.25%, assim como a percentagem de edifícios muito degradados foi reduzida de 2.92% para 1.67 %, tendo os resultados sido desenvolvidos a nível nacional.

Na Tabela 1 é possível analisar os resultados do INE (2012), em relação ao estado de degradação do parque edificado por época de construção:

*Tabela 1 - Estado de conservação do parque edificado por época de construção* (Fonte: INE, 2012)

Zona Geográfica	Época de construção						
	Total	1971-1980	1981-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2011
<b>Portugal</b>	2236179	588858	578845	268179	290292	300635	209370
<b>Sem necessidade de reparação</b>	1870942	425232	467456	231003	262516	283839	200896
<b>Com necessidade de reparação</b>	260945	160883	11091	36791	27459	16540	8181
<b>Pequenas reparações</b>	281489	120211	88017	30341	23068	13690	6162
<b>Reparações médias</b>	64055	32811	18540	5314	3628	2289	1473
<b>Grandes reparações</b>	14401	7861	3534	1136	763	561	546
<b>Muito degradado</b>	5292	2743	1298	385	317	256	293

Analisando os dados da Tabela 1, constata-se que os edifícios construídos anteriormente a 1990 apresentam um aumento considerável do número de edifícios com necessidades de reparação, em relação aos edifícios construídos posteriormente a essa data. Tal questão prende-se com o facto de que a maioria dos edifícios construídos anteriormente a 1990 não possuíam isolamento térmico. Somente com o aparecimento do primeiro Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), os edifícios novos viriam a incluir esta camada de isolamento, que se considera fundamental para uma melhoria de desempenho energético e de conforto térmico interior. Segundo o Ministério das Obras Públicas (1990), o RCCTE tinha como objetivo garantir que:

1. “As exigências de conforto térmico no seu interior possam vir a ser asseguradas sem dispêndio excessivo de energia”;
2. “Os elementos de construção não sofram efeitos patológicos derivados de condensações”.



Com maior significado desde o início do século XXI, a União Europeia tem vindo a procurar novas estratégias de melhoria do desempenho energético do parque edificado, através de intervenções de reabilitação. Não obstante os inúmeros benefícios resultantes deste tipo de intervenção, há que ter em consideração as diversas barreiras e desafios que impedem a realização de intervenções de melhoria substancial do desempenho energético de edifícios (Executive Agency for SMEs, 2017).

Segundo Atanasiu et al. (2011) as barreiras podem ser divididas em várias categorias:

1. “Financeiras”;
2. “Institucionais e administrativas”;
3. “Consciencialização, conhecimento e competências”;
4. “Separação de despesas e benefícios”.

No que toca às barreiras mais prejudiciais para o desenvolvimento da renovação do parque edificado, destacam-se as seguintes (Atanasiu et al., 2011):

1. Falta de capital para suportar os elevados custos de investimento e elevados períodos de retorno do investimento (“Financeiras”);
2. Incoerência e atraso na implementação de políticas, envelhecimento do parque edificado e discrepância entre partes interessadas (“Institucionais e administrativas”);
3. Desinteresse do consumidor por falta de conhecimento, falta de competência de profissionais e escassez de campanhas de consciencialização (“Consciencialização, conhecimento e competências”) e desinteresse do proprietário por não usufruir dos benefícios da renovação de uma forma direta (“Separação de despesas e benefícios”).

Da mesma maneira que as barreiras foram divididas em categorias, também os desafios o foram (Atanasiu et al., 2011):

1. Cadeia de abastecimento;
2. Qualidade de mão de obra;
3. Falhas técnicas;
4. Perturbação.

Estes desafios estão relacionados com a incapacidade de o mercado e a cadeia de abastecimento responderem a um aumento significativo das necessidades de reabilitação num curto espaço de tempo,

com a falta de mão-de-obra devidamente especializada e também com a perturbação causada ao utilizador do edifício no momento da intervenção (Atanasiu et al., 2011).

No sentido de ultrapassar tais barreiras e desafios, a Comissão Europeia entendeu que era necessário estabelecer orientações relativamente a estes assuntos, tais como a revisão de 2010 da *EPBD* e a *EED* de 2012 (Executive Agency for SMEs, 2017).

No que toca à revisão da *EPBD*, realizada em 2010, são discutidos os seguintes assuntos (European Commission, 2010):

1. Em consequência do longo ciclo de vida estimado de um edifício, “os edifícios existentes sujeitos a grandes obras de renovação deverão cumprir requisitos mínimos de desempenho energético adaptados ao clima local”;
2. Os Estados-Membros devem definir o conceito de “grandes obras de renovação”, podendo classificá-las consoante a percentagem da superfície envolvente do edifício ou o valor do edifício.

Relativamente à *EED*, a Comissão Europeia exige que cada um dos Estados-Membros estabeleça uma “estratégia a longo prazo” com o objetivo de incentivar empresas e proprietários privados de edifícios a investirem na renovação do parque nacional de edifícios residenciais e comerciais (European Commission, 2012a).

Mais recentemente, foi publicada a revisão da *EPBD* de 2018 (European Commission, 2018), que vem alterar em alguns aspetos a revisão de 2010 da *EPBD* e a *EED* de 2012. Neste documento é de destacar a importância da estratégia de reabilitação a longo prazo e nesse sentido, a Comissão Europeia instiga os Estados-Membros a adotarem medidas que auxiliem na “transformação rentável dos edifícios existentes em edifícios com necessidades quase nulas de energia”. Algumas das sugestões propostas neste mesmo documento passam pela criação de pontos de aconselhamento sobre as intervenções de renovação, divulgação de intervenções de reabilitação orientadas para a eficiência energética que tenham apresentado resultados positivos, entre outras sugestões (European Commission, 2018).

Em matéria de legislação nacional, somente em 2009 surgiu o primeiro decreto-lei, que estabelece o regime jurídico da reabilitação urbana. Embora fosse um documento promotor do desenvolvimento urbano, não apresentava uma ideologia capaz de assegurar a qualidade da intervenção em causa (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2009). Nesse sentido, foi elaborado o decreto-lei n.º 118/2013, com o propósito de “assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios através do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

(SCE), que integra o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) (Ministério da Economia e do Emprego, 2013a)."

Com o surgimento do decreto-lei n.º 118/2013 (Ministério da Economia e do Emprego, 2013a), verificou-se uma diferenciação entre edifícios novos, edifícios existentes e edifícios sujeitos a grandes intervenções, promovendo assim uma maior versatilidade e percepção das diretrizes regulamentares. No seguimento do que vinha sendo feito em regulamentações anteriores, para cada uma das categorias de edifícios, são atribuídos requisitos mínimos, ao nível do comportamento térmico e da eficiência dos sistemas técnicos, cada vez mais exigentes (Ministério da Economia e do Emprego, 2013a).

Os requisitos de desempenho energético de edifícios sujeitos a grandes intervenções foram definidos na Portaria n.º 349-B/2013 (Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, 2013), que posteriormente viriam a ser alterados na Portaria n.º 379-A/2015 (Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, 2015) e na Portaria n.º 319/2016 (Ministério da Economia, 2016). Como exemplo de um dos requisitos impostos, a *Tabela 2* demonstra a relação entre os valores das necessidades nominais e limite, consoante o ano de construção do edifício (Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, 2013).

*Tabela 2 - Relação entre os valores das necessidades nominais e limite, de energia útil para aquecimento, arrefecimento e energia primária de edifícios sujeitos a grandes intervenções* (Fonte: Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, 2013)

Ano de construção	$N_{ic}/N_i$	$N_{vc}/N_v$	$N_{tc}/N_t$
Anterior a 1960	Não aplicável	Não aplicável	1,50
Entre 1960 e 1990	1,25	1,25	1,50
Posterior a 1990	1,15	1,15	1,50

Reconhecendo a importância do tema, são amplas as investigações que procuram estabelecer estratégias de reabilitação que permitam mitigar o consumo energético dos edifícios, como é o caso dos estudos desenvolvidos por Almeida et al. (2014) e Belpoliti, Bizzarri, Boarin, Calzolari, & Davoli (2018).

O estudo elaborado por Almeida et al. (2014) incide no desenvolvimento de uma metodologia capaz de definir as soluções de reabilitação de custo ótimo, através da sua utilização num edifício de cariz

residencial, característico do parque edificado de Portugal. Os resultados revelam reduções de consumo de energia primária entre os 53% e os 81%, consoante os pacotes de medidas melhoria aplicados e ainda, uma diferença de cerca de 20% dos níveis ótimos de utilização de energia primária para os limites impostos na atual regulamentação.

Em contrapartida, o estudo desenvolvido por Belpoliti et al. (2018) pretende determinar o consumo energético base da cidade *Caporciano*, em Itália, e avaliar os benefícios energéticos resultantes da aplicação de cenários de reabilitação, através da aplicação de um método de cálculo de energia paramétrico. Considerando que apenas 36% dos edifícios em *Caporciano* estão permanentemente ocupados, resultado do risco de ocorrência de terremotos, e que os resultados são determinados para o grupo de edifícios que inclui todos os edifícios da cidade, é originada uma redução do consumo energético em cerca de 53%.

### 2.3.1 Implementação de medidas de reabilitação nos edifícios

Conforme salientado pelos estudos referidos, a implementação de um conjunto de medidas e políticas, aquando da realização de uma intervenção de reabilitação, são, indubitavelmente, o ponto fulcral para a melhoria das condições de conforto interior, do desempenho e balanço energético, e ainda para a redução de custos de operação de um edifício. Antes de se proceder com a reabilitação do edifício, deve ser elaborada uma análise ao seu nível de degradação, tipologia, localização geográfica, presença de patologias e de pontes térmicas na envolvente e orientação das fachadas, a fim de determinar as soluções mais rentáveis, a nível energético, económico e de conforto térmico (ADENE, LNEC, INETI, & IPQ, 2004).

As soluções de reabilitação energética podem ser divididas em dois grupos: as soluções passivas e as soluções ativas. As soluções passivas dizem respeito a todas as soluções que utilizam processos naturais, como os que regulam os fluxos de energia oriundos do sol, através de estratégias de arquitetura bioclimática, ao passo que as soluções ativas recorrem ao uso de equipamentos, consumidores de energia elétrica e/ou térmica (Manzano-Agugliaro, Montoya, Sabio-Ortega, & García-Cruz, 2015). Não obstante a elevada relevância de cada um dos tipos de soluções, é aconselhada a incorporação de ambos os tipos de solução, já que quando combinadas, possibilitam a satisfação dos requisitos de necessidades de energia e de comodidade dos utentes (Lanham, Gama, & Braz, 2004).

### 2.3.1.1 Soluções passivas

Associado às soluções passivas estão todas as soluções relacionadas com os elementos de construção constituintes da envolvente exterior, nomeadamente as paredes exteriores, pavimentos em contacto com o exterior ou espaços não-aquecidos, coberturas e vãos envidraçados (ADENE et al., 2004).

As intervenções realizadas ao nível da envolvente exterior têm o propósito de manter um certo nível de conforto interior através da prevenção de transferências de calor, do interior para exterior, da correção de pontes térmicas e patologias e do controlo de fluxos de radiação solar (Silva, 2012).

No caso das paredes exteriores, pavimentos e coberturas, a reabilitação passa por adicionar ou substituir uma camada de isolamento térmico, enquanto para os vãos envidraçados, passa pela substituição da caixilharia e vidros, mas também pela aplicação de estratégias de controlo de ganhos solares. Mesmo sendo estas as medidas, de uma forma genérica, que permitam reduzir as perdas de energia pela envolvente, apenas através de uma análise criteriosa, composta de diversos fatores, é possível selecionar as medidas mais pertinentes e indicadas para a situação em causa. Tal análise permite averiguar parâmetros relacionados com dados geométricos, termofísicos, geológicos, cronológicos, morfológicos e climáticos (International Energy Agency, 2013).

Um dos parâmetros mais relevantes, no que toca à avaliação do comportamento térmico da envolvente, é o coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ). Este coeficiente “define a capacidade de um elemento da estrutura transmitir calor sob condições do estado estacionário. É uma medida da quantidade de calor que fluirá através da área de unidade no tempo unitário por diferença de unidade na temperatura dos ambientes individuais entre os quais a estrutura intervém” (Willoughby, 2003). Quanto menor for o valor do coeficiente, melhor termicamente isolado estará o elemento. Um bom desempenho térmico, para além de gerar reduções no consumo de energia, nas vertentes de aquecimento e arrefecimento, e de promover um bom conforto térmico, também auxilia na prevenção do aparecimento de pontes térmicas e de patologias. Tais anomalias podem comprometer o desempenho térmico dos elementos construtivos e até mesmo, gerar danos na estrutura do edifício (Nunes & Tirone, 2007).

Como já foi referido anteriormente, a adição/substituição da camada de isolamento térmico nos elementos construtivos da envolvente exterior é uma das principais medidas numa intervenção de reabilitação. Dessa forma, importa identificar os principais materiais de isolamento térmico e as suas

vantagens de aplicação, no sentido de se selecionar os mais pertinentes para o edifício em causa, conforme é exemplificado na *Tabela 3*.

Importa salientar que, em Portugal, todos os isolamentos apresentados na *Tabela 3* são utilizados em obra em situações distintas. Apesar disso, o aglomerado de cortiça natural expandida e o EPS destacam-se dos outros.

*Tabela 3 - Tipos de isolantes térmicos e suas vantagens* (Fonte: Silva, 2013)

<b>Isolantes térmicos</b>	<b>Vantagens de aplicação</b>
<b>EPS (poliestireno expandido)</b>	Boa resistência mecânica, de baixo custo, leveza, versatilidade e de fácil aplicação
<b>XPS (poliestireno extrudido)</b>	Boa resistência mecânica, leveza, estabilidade dimensional, boa resistência ao vapor de água e de fácil aplicação
<b>PUR (espuma de poliuretano)</b>	Boa resistência mecânica, boa resistência aos produtos químicos, leveza e de fácil aplicação
<b>LM (lã mineral)</b>	Bom desempenho térmico e acústico, excelente resistência ao fogo, sustentabilidade e de fácil aplicação
<b>ACE (aglomerado de cortiça natural expandida)</b>	Elevada durabilidade, de fácil aplicação, excelente isolante acústico, boa resistência ao fogo e 100% reciclável

A cortiça é um produto produzido a nível nacional e é 100% reciclável. Este produto, apesar de ter um desempenho térmico ligeiramente inferior em relação aos outros isolamentos e de ter um custo algo elevado, possui excelente durabilidade e desempenho acústico.

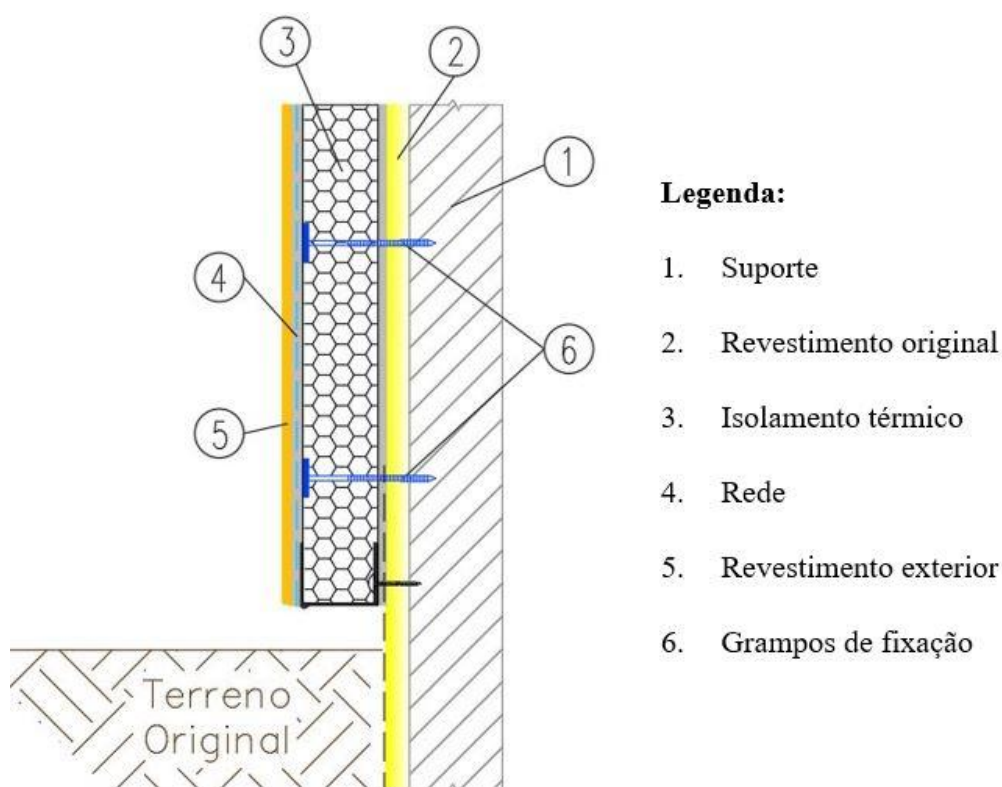
Por outro lado, o EPS destaca-se mais pelo baixo custo, pela versatilidade e pelo elevado desempenho térmico.

#### 2.3.1.1.1 Paredes exteriores

A aplicação de isolamento térmico em paredes exteriores pode ser efetuada segundo as seguintes posições, relativas às restantes camadas (EnerBuilding, 2008):

1. Isolamento térmico exterior;
2. Isolamento interior;
3. Isolamento térmico na caixa de ar.

A aplicação mais corrente em termos de reabilitação é o isolamento térmico pelo exterior, por apresentar maior número de benefícios em relação às restantes opções (*Figura 1*). A solução inerente à colocação de isolamento térmico na caixa de ar é a menos utilizada e só pode ser executada aquando da existência de paredes duplas. Na Tabela 4 são retratadas as vantagens e desvantagens do isolamento térmico pelo interior e pelo exterior (EnerBuilding, 2008).



*Figura 1 - Exemplo de solução com aplicação de isolamento térmico pelo exterior (Fonte: Weber, 2018)*

*Tabela 4 - Comparação entre isolamento térmico pelo exterior e isolamento térmico pelo interior* (Fonte: adaptado de EnerBuilding, 2008)

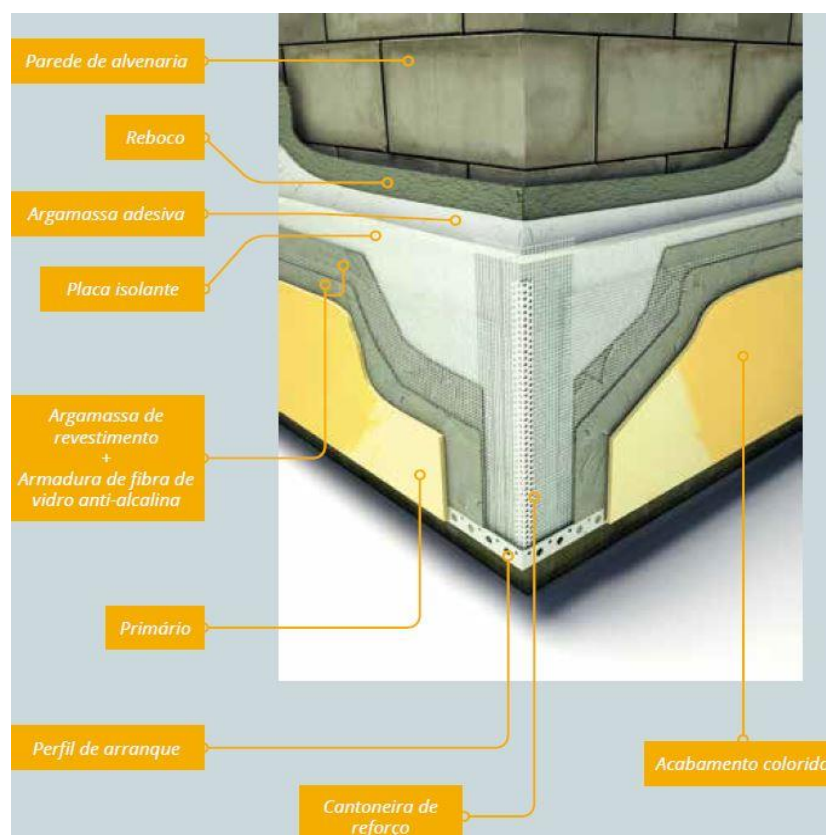
	Isolamento térmico pelo exterior	Isolamento térmico pelo interior
<b>Vantagens</b>	Elevada eficácia na eliminação de pontes térmicas e de zonas de condensação, conservação da inércia térmica, preservação das áreas de espaços interiores e proteção contra agentes atmosféricos	Facilidade de aplicação, baixo custo, preservação da fachada
<b>Desvantagens</b>	Custo, mão-de-obra especializada, restrições arquitetónicas	Ineficácia na eliminação de pontes térmicas em vigas e lajes, vulnerabilidade a ocorrência de condensações, desaproveitamento da inércia térmica

Atualmente no mercado da reabilitação podem ser encontrados diversos tipos de sistemas de aplicação de isolamento térmico em paredes exteriores, se bem que existem dois sistemas, com aplicação de isolamento térmico pelo exterior, que se destacam dos restantes. Tais sistemas são denominados por:

1. Sistema ETICS;
2. Sistema Fachada Ventilada.

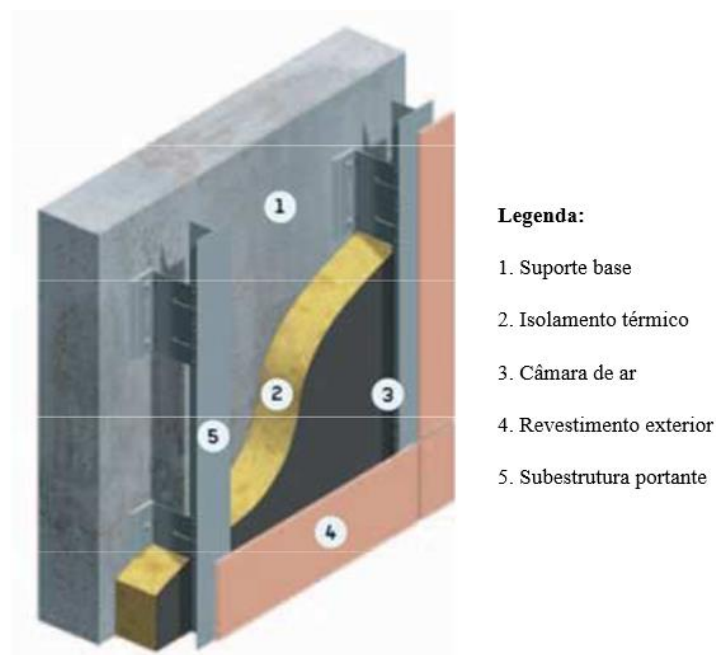
O primeiro sistema identificado, o sistema ETICS, cujo nome significa “*External Thermal Insulation Composite System*”, é capaz de cumprir os requisitos dos regulamentos em vigor e de dar resposta às necessidades crescentes de conforto impostas pelos utentes (APFAC, 2015). Este sistema é composto pelas camadas expostas na Figura 2.





*Figura 2 - Camadas constituintes do sistema ETICS (Fonte: APFAC, 2015)*

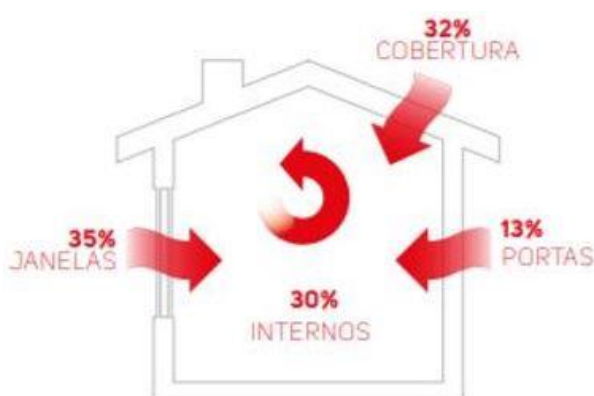
O segundo sistema em causa, a fachada ventilada, destaca-se pela sua aparência inovadora, pelo desempenho térmico e acústico e pelo contacto existente entre a fachada e o exterior. O próprio sistema possui uma câmara de ar incorporada que, através do aquecimento, provoca a ventilação do ar num movimento ascendente. Este efeito, designado por efeito de chaminé, proporciona a eliminação do calor absorvido pelo revestimento exterior da fachada, especialmente no Verão (Campos, 2011). Este sistema é composto pelas camadas apresentadas na Figura 3.



*Figura 3 - Camadas constituintes de Fachada Ventilada (Fonte: Allface, 2008)*

#### 2.3.1.1.2 Vãos envidraçados

Os vãos envidraçados, por norma, correspondem ao elemento construtivo mais influente, no que toca a trocas de fluxo de calor entre o exterior e o interior (EnerBuilding, 2008) (Figura 4). A intervenção em vãos envidraçados tem em vista o controlo de ganhos solares, a reparação de pontes térmicas, a otimização do sistema de ventilação natural e o aproveitamento dos raios solares para iluminação natural (ADENE et al., 2004).



*Figura 4 - Ganhos de calor numa habitação (Fonte: ADENE, 2016c)*

Os fatores que, regularmente, mais influenciam o desempenho térmico dos vãos envidraçados são o vidro, a caixilharia, a área de envidraçado e a orientação, e por isso, tendem a ser o foco nas intervenções realizadas (ADENE, APA, & EPAL, 2018).

A combinação das medidas de reabilitação dos vãos envidraçados pode ser efetuada segundo um dos três princípios de intervenção (Martins, 2009):

1. Preservação da janela existente, mas com adição ou substituição de certos componentes constituintes, com o objetivo de corresponder às exigências atuais de desempenho energético-ambiental;
2. Substituição da janela existente por uma janela adequada às exigências atuais de desempenho energético-ambiental. Nesta situação existem duas hipóteses: Introdução de janela nova, preservando o traçado arquitetónico existente e introdução de janela nova, sem preservar o traçado arquitetónico existente;
3. Implementação de medidas adicionais para o melhoramento da eficiência energética, através da introdução de sistemas de sombreamento, reparação de pontes térmicas, alteração da área de vão envidraçado, entre outros.

Como já foi referido anteriormente, um dos grandes objetivos da reabilitação dos vãos envidraçados é o controlo dos ganhos solares. De modo a que esse objetivo seja cumprido, algumas estratégias podem ser delineadas (Figura 5).

Em primeiro lugar, quando possível, deve ser assegurado o posicionamento da maior parte dos vãos envidraçados na fachada virada a Sul, e uma minoração da área de envidraçados na fachada virada a Norte, pois assim, é possível maximizar os ganhos solares no Inverno e minimizá-los no Verão, tendo em atenção que este conceito somente se aplica no caso do edifício em questão se localizar no hemisfério Norte (ADENE et al., 2004).

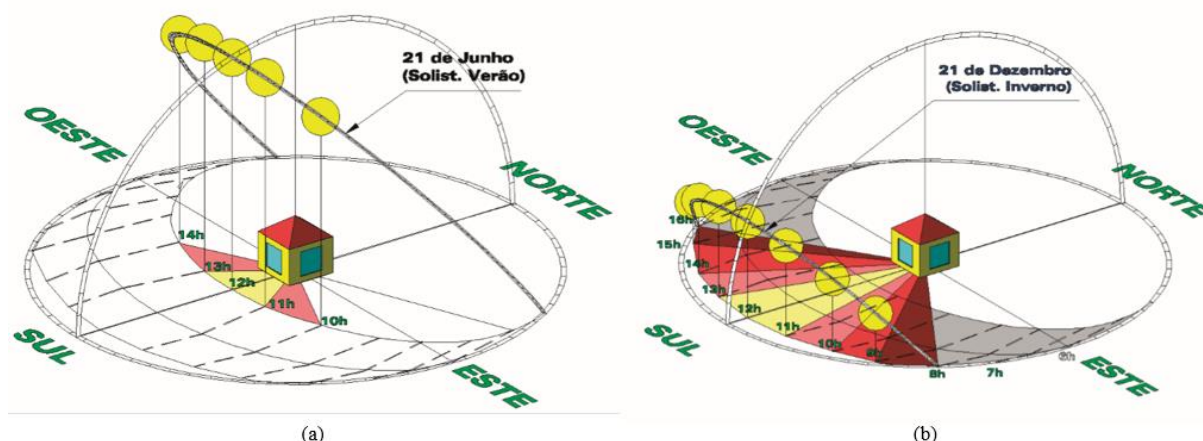


Figura 5 - Orientação solar no Verão para o hemisfério Norte (a); Orientação solar no Inverno para o hemisfério Norte (b) (Fonte: Gonçalves & Graça, 2004)

Numa reabilitação é mais provável que não seja possível a reorientação dos vãos existentes. No entanto, nestes elementos podem ainda ser incorporados dispositivos de obstrução à radiação solar (Figura 6). Estes dispositivos podem ser instalados no exterior ou no interior, embora que os dispositivos no exterior desempenhem melhor o seu papel, visto que a radiação solar que embate no dispositivo é absorvida e refletida no exterior, não atravessando para o interior do edifício, o que proporciona um impedimento de ganhos de calor até 96%. Ao invés destes, os dispositivos interiores permitem a entrada de calor no interior do edifício, o que se traduz num impedimento de ganhos de calor até 62%, sendo por vezes necessário a intervenção de sistemas artificiais de ventilação e arrefecimento para corrigir o aumento de temperatura indesejável (ADENE, 2016b).



Figura 6 - Exemplo de dispositivo de proteção solar exterior (a); Exemplo de dispositivo de proteção solar interior (b) (Fontes: Alumínios Souto, 2011; BibLus, 2018)

Os vãos envidraçados têm, igualmente, uma função importante na ventilação dos espaços interiores. O processo de ventilação natural é extremamente importante na manutenção da qualidade do ar interior, na prevenção de condensações e na melhoria do nível de conforto térmico interior. Este processo baseia-se em trocas de massas de ar entre o interior e o exterior, promovidas pela ação do vento ou por diferenças de temperaturas e/ou pressões entre o exterior e o interior (EnerBuilding, 2008). Segundo Viegas (2010), o processo de ventilação promovido pela variação de temperatura entre ambiente exterior e interior, só é eficaz quando esta diferença se apresenta superior a 8°C.

As trocas de massas de ar, normalmente, são efetuadas através de aberturas propositadamente incorporadas na envolvente exterior, tal como portas, janelas e grelhas de ventilação. Embora este processo seja o mais desejável e a única opção fiável para a otimização de ventilação natural, podem existir infiltrações de ar, através de pequenas fendas, que comprometem o equilíbrio deste processo (ADENE, 2016d).

A manutenção de uma boa qualidade do ar interior está dependente da taxa de renovação do ar mínima, que pode ser determinada consoante alguns aspetos e parâmetros, assim como o comportamento dos utentes, a quantidade de utentes a habitar no edifício, a queima de combustíveis fósseis, a quantidade de equipamentos, o ato de cozinhar, entre outros (APA, 2009).

#### 2.3.1.2 Soluções Ativas

As soluções ativas, em conjunto com as soluções passivas, proporcionam aos utentes as condições ideais de conforto térmico interior. Associado a soluções ativas estão todas as soluções relacionadas com equipamentos ou sistemas. Estes equipamentos ou sistemas têm variadas finalidades, tais como:

1. Arrefecimento dos espaços;
2. Aquecimentos dos espaços;
3. Aquecimento de águas sanitárias;
4. Uso doméstico (eletrodomésticos, iluminação...);
5. Energia solar térmica;
6. Energia solar fotovoltaica;

#### 2.3.1.2.1 Bombas de calor

As bombas de calor são dispositivos que geram calor para finalidades como o aquecimento de águas sanitárias ou o aquecimento e arrefecimento dos espaços (Figura 7). Os coeficientes de desempenho das bombas de calor dependem de variados fatores, como a temperatura do evaporador, a temperatura do calor útil fornecido e as características dos componentes do dispositivo (Hepbasli & Kalinci, 2009). Durante a estação de aquecimento, este tipo de equipamento absorve o calor do ar, água ou solo e concentra-o num tanque de armazenamento para aquecer a água e transfere o restante para aquecer as divisões do edifício. No caso da estação de arrefecimento, transfere o calor dos espaços interiores para o exterior (U.S. Department of Energy, 2018).



*Figura 7 - Exemplo de bomba de calor para produção de água quente (Fonte: Daikin, 2018)*

#### 2.3.1.2.2 Caldeiras

As caldeiras são dispositivos com o propósito de produzir calor para as seguintes finalidades de energia: aquecimento dos espaços e aquecimento de águas sanitárias. Atualmente, existem vários tipos de caldeiras: a gás natural, a propano/butano, a combustível líquido e a biomassa (ADENE, 2016b). De qualquer das formas, há duas delas que se destacam, a caldeira a biomassa e a caldeira de condensação a gás. Ambos os equipamentos recorrem ao processo de combustão para produzir calor, mas a caldeira a biomassa utiliza matéria orgânica e a caldeira de condensação utiliza gás como combustível.

No caso da caldeira a biomassa, esta destaca-se pela utilização de um combustível de origem renovável, levando a reduções bastante significativas de emissões de gases com efeito de estufa (The Green Age, 2017).

A caldeira de condensação (Figura 8), apesar de utilizar o gás como combustível para produzir calor, é um equipamento de elevada eficiência e com um valor de emissões de CO<sub>2</sub> bastante reduzido, comparativamente às caldeiras convencionais. Para além disso, é capaz de reaproveitar o calor desperdiçado nos vapores, situação que não acontece com as caldeiras convencionais (Politéc, 2018). A única desvantagem inerente a este equipamento é o preço, contudo há a possibilidade de amortizar o investimento a médio/longo prazo, graças às poupanças de energia mensais proporcionadas pela elevada eficiência do mesmo (Deco Proteste, 2014).



*Figura 8 - Exemplo de caldeira de condensação a gás mural (Fonte: Daikin, 2018a)*

#### 2.3.1.2.3 Ar condicionado

O ar condicionado é um equipamento que visa a renovação do ar interior, o controlo da climatização do espaço e a desumidificação. Nos dias de hoje, podem-se encontrar disponíveis no mercado, três tipos de sistemas: o portátil, o *mono-split* e o *multi-split* (ADENE, 2016a).

1. O sistema portátil é um sistema não muito requisitado, pela sua baixa eficiência, tendo apenas como vantagens a mobilidade e a dispensa de instalação;
2. O sistema *mono-split* é bastante comum, sendo apresentado por uma unidade exterior e interior. Apesar de ser mais eficiente que o sistema portátil, apenas pode intervir numa divisão do edifício;

3. O sistema *multi-split* apresenta uma unidade exterior e várias unidades interiores, e por isso, é capaz de atuar sobre várias divisões, o que não acontece com o *mono-split*. Para além disso, também permite configurar cada unidade interior de forma individual, não permitindo apenas ciclos de aquecimento e arrefecimento simultâneos (Figura 9).



*Figura 9 - Exemplo de sistema multi-split (Fonte: Daikin, 2018a)*

#### 2.3.1.2.4 Energias renováveis

As fontes de energias renováveis são um ponto de viragem na forma como os sistemas e tecnologias são abastecidos de energia. Estas fontes de energia têm o propósito de substituir a energia fóssil, que ao contrário das energias renováveis, são fontes de energia não renováveis. As energias renováveis podem ser divididas nas seguintes subcategorias: energia solar, energia da biomassa, energia eólica, energia hídrica e energia geotérmica.

##### 1. Energia solar

A energia proveniente do sol pode ser convertida diretamente em calor ou eletricidade, consoante o sistema que está a ser utilizado. Em termos de sistemas capazes de produzir energia através das radiações solares, existem os painéis fotovoltaicos e os painéis solares térmicos. No caso dos painéis fotovoltaicos, é possível a produção de eletricidade, enquanto que os painéis solares térmicos são capazes de produzir calor, que posteriormente poderão ser utilizados para o aquecimento e

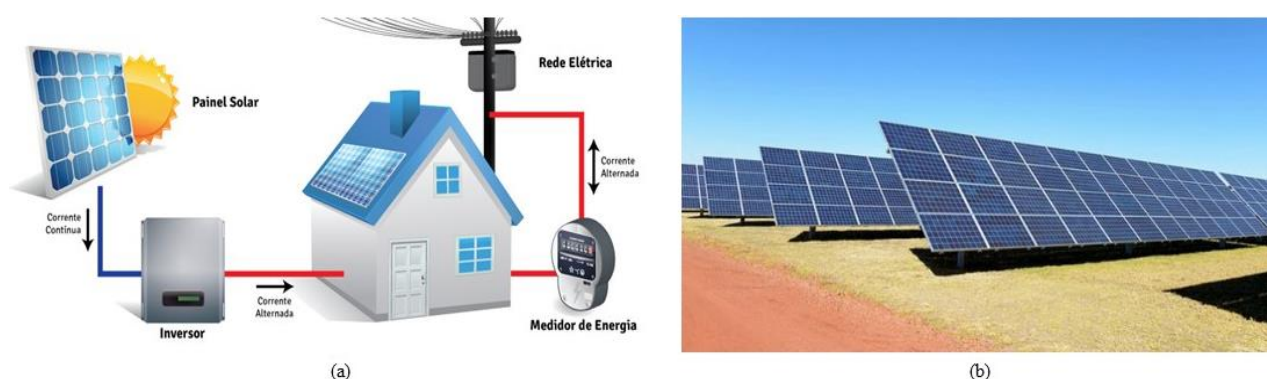


arrefecimento dos espaços, aquecimento de água doméstica e também para necessidades de energia elétrica (IEA, 2018).

### 1.1. Painéis Fotovoltaicos

Este tipo de tecnologia tem vindo a tomar protagonismo por todo o mundo, não só por não emitir qualquer tipo de poluente e por não consumir nenhum ou quase nenhum tipo de recurso natural, mas também pela praticabilidade que oferece. Apesar de, no período inicial da sua implementação ter sido uma tecnologia com custo de investimento relativamente elevado, nos últimos anos esse custo tem vindo a baixar, graças à elevada aderência por parte dos consumidores, impulsionando assim o mercado global (IEA, 2014b).

Os painéis fotovoltaicos (Figura 10) podem estar ligados a uma rede pública de energia elétrica, permitindo ao consumidor a devolução para a rede de energia em excesso ou podem ser parte de um sistema isolado, onde o edifício em causa está totalmente dependente da energia produzida pelos sistemas do próprio edifício para satisfazer as suas necessidades energéticas. No caso dos painéis ligados à rede pública, é requerido um sistema adicional que permite o transporte de corrente e a conversão de corrente contínua em corrente alternada (IEA, 2014b).



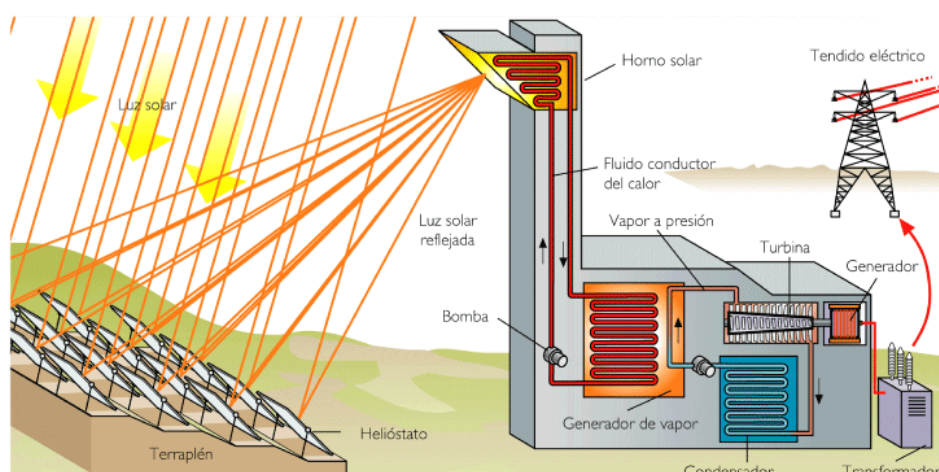
*Figura 10 - Sistema "on-grid" com integração de painéis fotovoltaicos (a); Painéis fotovoltaicos (b)*  
(Fontes: Portal Energia, 2016b; Trilhos Energéticos, 2018)

### 1.2. Painéis solares térmicos para produção de eletricidade

A produção de energia elétrica através de painéis solares térmicos só é possível recorrendo a uma concentração desta tecnologia num central solar térmica (Figura 11). Apesar de este tipo de tecnologia

ter um elevado potencial, tem vindo a ter um nível de desenvolvimento no mercado bastante reduzido, comparativamente aos painéis fotovoltaicos (IEA, 2014c).

Mesmo sem uma evolução muito notória, este sistema de produção de eletricidade permite o armazenamento de energia térmica para posterior conversão para eletricidade e a produção de eletricidade, mesmo quando o sol estiver tapado pelas nuvens, após o pôr do sol e nos períodos de maior necessidade energética, isto quando são combinados equipamentos de combustíveis fósseis (IEA, 2014c).



*Figura 11 - Central solar térmica (Fonte: Energía Solar, 2015)*

### 1.3. Painéis solares térmicos para aquecimento e arrefecimento

Os painéis solares térmicos podem ser utilizados para variadas finalidades, entre as quais: aquecimento dos espaços, arrefecimento dos espaços e aquecimento de águas sanitárias (Figura 12). Esta tecnologia revela-se bastante flexível, em relação à conexão com equipamentos de apoio de aquecimento e arrefecimento. Em termos económicos, apresenta um custo de investimento razoavelmente elevado mas em contrapartida, os custos de manutenção são bastante reduzidos (IEA, 2012b).

Quando utilizados para um propósito individual, existem duas versões que se destacam das outras: o coletor solar plano e o coletor solar de tubos de vácuo. O coletor solar plano é um tipo de sistema mais acessível em termos de investimento inicial embora o coletor solar de tubos de vácuo tenha melhor rendimento, especialmente em locais com condições de baixa radiação solar (IEA, 2012b).



*Figura 12 - Coletor solar plano com sistema de termossifão (Fonte: Deco Proteste, 2018)*

## 2. Energia da biomassa

A biomassa em si corresponde a matéria orgânica de origem vegetal ou animal que é utilizada como combustível para satisfazer as necessidades de aquecimento de espaços e aquecimento de águas sanitárias (IEA, 2017).

Esta biomassa pode também ser colocada num forno, onde é produzido calor, que posteriormente se transformará em gases ou combustíveis líquidos, como é o caso do biogás e do etanol. A forma mais comum de produzir energia a partir da biomassa é através da combustão (Figura 13), embora existam outros processos, nomeadamente a pirólise, a gasificação, a transesterificação e a fermentação (IEA, 2017).

Nos dias de hoje, a energia de biomassa já é utilizada como combustível para transportes e é capaz de produzir eletricidade, calor e até mesmo a cogeração (IEA, 2017).

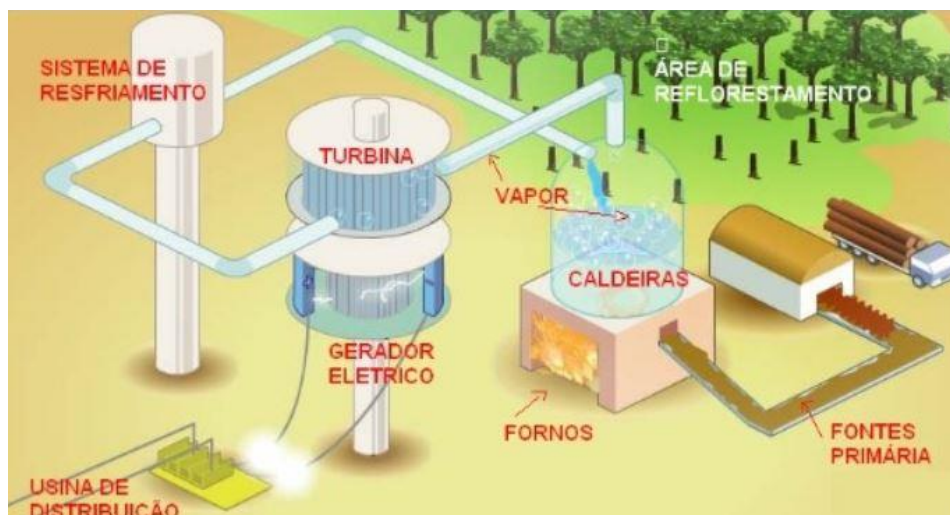


Figura 13 - Esquema de produção de energia de biomassa (Fonte: Portal Energia, 2016a)

### 3. Energia eólica

A energia eólica é produzida através da transformação de energia do vento em energia elétrica e caracteriza-se como uma forma de produção elétrica amiga do ambiente, visto que não produz qualquer tipo de poluente e não utiliza qualquer tipo de recurso natural, a não ser no momento da produção dos equipamentos (IEA, 2013).

Os equipamentos que transformam a energia do vento em energia elétrica são colocados em zonas de maior incidência do vento para produzir a maior quantidade de energia possível, sendo que os equipamentos usualmente utilizados são os aerogeradores. Quando numa zona são instalados vários aerogeradores, estes podem se designar de parque eólico (Figura 14). Nos aerogeradores, as pás, com a força do vento, giram enquanto o gerador transforma a energia do vento em energia elétrica. De seguida, essa energia elétrica é transportada por um cabo no interior do equipamento até à rede pública de eletricidade (IEA, 2013).



*Figura 14 - Parque eólico (Fonte: NOCTULA, 2016)*

#### 4. Energia hídrica

A energia hídrica provém da energia provocada pelo movimento da água, sendo esta utilizada para gerar energia elétrica através de barragens (Figura 15). Para além da produção de eletricidade, as barragens também podem ter outras finalidades, tal como o abastecimento de água, controlo de enchentes, irrigação, navegação e pesca. Uma das grandes vantagens das barragens é a capacidade de retenção do fluxo da água, criando assim um depósito de água de grandes dimensões, designado de albufeira. Assim que as comportas da barragem são abertas, a água movimenta-se por ação da gravidade e provoca a rotação das turbinas, que geram eletricidade com o auxílio de geradores (IEA, 2012a).



*Figura 15 - Barragem do Alto – Lindoso (Fonte: Engenharia Civil Online, 2011)*



## 5. Energia geotérmica

A energia geotérmica (Figura 16) é energia gerada pelo calor que pode ser encontrado em vapores ou líquidos, a uma determinada profundidade da superfície da terra, de modo a que possam ser encontrados a uma temperatura elevada e posteriormente utilizados para produzir eletricidade e calor (IEA, 2011).

A energia geotérmica pode ser extraída do solo através de utilização direta, de sistemas geotérmicos ou bombas de calor geotérmico (IEA, 2011):

1. Na utilização direta recorre-se a reservatórios geotérmicos de temperaturas baixas a moderadas, que podem produzir calor de forma direta. Este processo é protagonizado em centrais binárias;
2. Os sistemas geotérmicos aprimorados recorrem à injeção de água, a uma certa pressão, por uma fratura efetuada na rocha, reforçando assim a sua permeabilidade. A água injetada, ao entrar em contato com a rocha, aquece e retorna à superfície através de poços de produção;
3. As bombas de calor geotérmicas recorrem à diferença de temperatura entre o solo e o ar para fornecer calor ou eletricidade.



*Figura 16 - Central geotérmica da Ribeira Grande (Fonte: Comissão Europeia, 2006)*

## 2.4 Metodologias de avaliação de desempenho energético

Neste subcapítulo, são apresentados e comparados os métodos de avaliação de desempenho energético, bem como os tipos de abordagem existentes. Ainda neste subcapítulo, é realizada uma pesquisa de estudos de avaliação do desempenho energético à escala urbana, isto é, de um grupo de edifícios.

### 2.4.1 Métodos de avaliação

Na revisão de literatura podem ser encontrados dois tipos de métodos de avaliação: método quase estacionário e método dinâmico. O tipo de método de avaliação, para este caso em particular, está relacionado com a forma como os índices de avaliação do desempenho energético do grupo de edifícios são calculados.

O método quase estacionário é um método de cálculo simplificado, de rápida execução e não recorre a qualquer tipo de *software* de simulação para a realização dos cálculos (Jacinto, 2014). Como exemplo de aplicação deste método existe o método simplificado de cálculo mensal, apresentado na mais recente versão da norma EN ISO 52016:2017. O objetivo deste modelo passa por determinar as necessidades de aquecimento e arrefecimento de um edifício, com recurso a uma análise de cálculos com intervalos mensais, tendo em consideração que os cálculos efetuados em cada mês devem ser realizados, separadamente, para a estação de arrefecimento e para a estação de aquecimento (ISO, 2017a). A adoção deste tipo de método pode trazer inúmeras vantagens para o cálculo das necessidades energéticas dos edifícios, especialmente quando as quantidades de parâmetros recolhidos acerca dos edifícios não são vastas. Este tipo de modelo tem vindo a ser integrado em diversos estudos de investigação, nomeadamente nos que foram elaborados por Corrado, Ballarini, & Paduos (2014), Dascalaki, Droutsas, Balaras, & Kontoyiannidis (2011), Fracastoro & Serraino (2011), entre outros.

O método dinâmico recorre a uma avaliação horária ou sub-horária dos parâmetros de entrada, e para isso, é necessário a integração de dados relacionados com a localização geográfica, o clima, a geometria do edifício, o número de ocupantes e seus comportamentos, as soluções construtivas existentes, os sistemas de aquecimento, arrefecimento e aquecimento de águas sanitárias, os eletrodomésticos, as características de cada equipamento e sistema, entre outros parâmetros (Moraes, 2017).

Com a recolha de todos os dados necessários, segue-se a introdução das informações num *software* (Morais, 2017), onde se dá início à simulação dinâmica, definida pelo Ministério da Economia e do Emprego (2013a) como “a previsão de consumos de energia correspondentes ao funcionamento de um edifício e respetivos sistemas energéticos que tome em conta a evolução de todos os parâmetros relevantes com a precisão adequada, numa base de tempo pelo menos horária, para diferentes zonas térmicas e condições climáticas de um ano de referência”. Após a introdução dos dados, o *software* é capaz de gerar os resultados pretendidos para a determinação do desempenho energético do edifício.

Comparando ambos os métodos, o método dinâmico pode revelar-se mais completo que o método quase estacionário, pois é capaz de fazer análises horárias e diárias das condições climáticas, de operações relacionadas com o comportamento e atividades dos utentes, entre outros.

No entanto, em consequência da elevada quantidade de dados necessários, o método dinâmico requiere a utilização de um *software* de simulação, tornando o processo mais complicado e moroso em relação ao método simplificado (ISO, 2017a), que é utilizado para avaliação de desempenho energético de edifícios residenciais na maior parte das normas regulamentares dos países europeus.

#### 2.4.2 Avaliação de desempenho energético à escala urbana

Recentemente, a análise do desempenho energético do parque edificado tem presenciado uma transição do foco no nível de agregação, nomeadamente, na alteração da escala de um edifício para uma escala de um grupo de edifícios (Almeida & Barbosa, 2018).

Tal transição pode promover efeitos de economia de escala e beneficiar de sinergias entre medidas de eficiência energética e a implementação de sistemas baseados em fontes de energia renovável, que não seriam possíveis de obter ao nível do edifício. Mesmo que todos estes benefícios possam ser adquiridos pela adoção da escala de grupo de edifícios, pode tornar-se uma tarefa com um grau de dificuldade elevado, pela necessidade de um equilíbrio entre a redução de consumo de energia primária e o custo global inerente às medidas de reabilitação (Almeida & Barbosa, 2018).

Seguindo uma revisão de literatura científica criteriosa e abrangente, foi desenvolvida uma comparação das diversas metodologias de avaliação do desempenho energético à escala de um conjunto de edifícios, provenientes de uma análise abrangente a cada um dos artigos científicos e estudos de investigação encontrados. Nessa comparação, foram analisados vários parâmetros, tais como o tipo de metodologia



aplicada, tipo de abordagem/aproximação, nível de agregação, nível de desagregação, finalidade do modelo, unidade de saída, entre outros.

Existem duas abordagens usadas (por vezes em simultâneo) para a avaliação do desempenho energético de um grupo de edifícios: A abordagem “*top down*” e a abordagem “*bottom up*”.

A aproximação/abordagem “*top-down*” exerce a avaliação/caracterização/determinação do consumo de energia e/ou de emissões de carbono a um nível agregado, ou seja, ao nível de cidade/região/país. Esta identifica-se por não individualizar cada um dos consumos de energia por utilização final e também por operar com variáveis inerentes ao passado, tal como indicadores macroeconómicos, condições climáticas, taxas de construção, estimativas de posse de tecnologias e número de habitações. Usualmente, é também utilizada para constatar a relação entre a energia e a economia através de modelos econométricos e tecnológicos (Kavgic et al., 2010).

No que diz respeito à abordagem “*bottom-up*”, os dados disponíveis são incorporados numa base de dados a um nível desagregado, ou seja, ao nível do edifício ou conjunto de edifícios, o que obriga à existência de vastos dados empíricos. Somente após a introdução de informações na base de dados, estas poderão ser extrapolados para avaliar/caracterizar/determinar o consumo de energia e/ou de emissões de carbono de uma cidade/região/país. Ao contrário da abordagem “*top-down*”, considera o consumo de energia por utilização final individual e recorre a medidas de eficiência energética individuais, como por exemplo a escolha de tecnologias mais rentáveis e processos que potencialmente poderão induzir o melhor equilíbrio possível entre custos, consumo de energia e emissões de carbono. Consoante os tipos de dados de entrada na base de dados, podem ser empregues modelos estatísticos, físicos e híbridos (Kavgic et al., 2010).

Resumidamente, a abordagem “*top-down*” advém de uma estimativa do consumo total de energia do setor residencial e outros indicadores de desempenho energético, com o propósito de os atribuir às características do parque edificado, ao passo que a abordagem “*bottom-up*” trata de calcular o consumo de energia ou outros indicadores de desempenho energético de habitações isoladas e posteriormente extrapola esses resultados para uma escala de grupo de edifícios (Swan & Ugursal, 2009).

A Tabela 5 apresenta um resumo das principais abordagens encontradas na literatura e é efetuada uma distinção entre o tipo de abordagem e o tipo de modelo implementado em cada um desses estudos de investigação (para a tabela completa consultar o Anexo I). Quanto ao tipo de abordagem, “*bottom-up*” ou “*top-down*”, torna-se evidente que o “*bottom-up*” é bastante mais usado que o “*top-down*”. As

metodologias apoiadas pela abordagem “*bottom-up*” focam-se, essencialmente, na estimativa ou no cálculo de certos indicadores de desempenho energético dos edifícios, na avaliação do desempenho energético e no desenvolvimento de estratégias de melhoria do desempenho energético, como é o caso dos estudos protagonizados por Belussi et al. (2017), Caputo, Costa, & Ferrari (2013), Gouveia, Palma, Seixas, & Simões (2017), Wang, Landolt, Mavromatidis, Orehounig, & Carmeliet, (2018), Tuominen, Holopainen, Eskola, Jokisalo, & Airaksinen (2014).

*Tabela 5 – Excerto da tabela resumo com comparação de metodologias através do tipo de abordagem implementado*

Abordagem	Tipo de modelo	Metodologias (Ferramentas utilizadas)	Método de cálculo	Finalidade do modelo	Exemplos
<b>Top down (A)</b>	A.1.) econométrico	estatística, economia (sem informação)	dinâmico	analisar as causas económicas e organizacionais subjacentes à estagnação do aumento da eficiência energética no setor da construção	(Sprei & Holmberg, 2008)
	A.2.1.) tecnológico	estatística, GIS, "heat gain utilization factor" (Ecotect Weather, ferramentas baseadas no GIS e E-SDOB)	simplificado	avaliar o desempenho energético de stocks de edifícios de grande escala e tornar disponível um processo mais integrado de planeamento para a eficiência energética	Poggi, Firmino & Amado (2017); Fracastoro & Serrano (2011)
	A.2.2.) tecnológico	dinâmica de sistemas, microeconomia (Vensim software)	dinâmico	fornecer conhecimentos sobre os desafios sócio-técnicos na implementação de medidas de eficiência energética	Fazeli, R., & Davidsdottir, B. (2018)
<b>Bottom up (B)</b>	B.1.1.) estatístico	REH, GIS, estatística, tipologia de construção, regressão linear múltipla robusta, (QGIS software, ArcView software, TABLE, KnaufTermPro2, ferramentas baseadas no GIS, TEE-KENAK, MS Excel, Visual Basic, MS Access e ArcGIS)	simplificado	determinação e avaliação do desempenho energético dos edifícios	Gouveia, Palma, Seixas & Simões (2017); Dall'o', Galante & Torri (2012)
	B.1.2.) estatístico	estatística, GIS (EnergyPlus e ferramentas baseadas no GIS)	dinâmico	caracterização e avaliação do desempenho energético e investigação de novas estratégias de melhoria da eficiência energética dos edifícios	Caputo, Costa & Ferrari (2013); Ascione, De Masi, de Rossi, Fistola, Sasso & Vanoli (2013)
	B.2.1.) física	estatística, GIS (ferramentas baseadas no GIS)	simplificado	estimação/cálculo/avaliação do desempenho energético de edifícios e apoiar na caracterização do parque edificado	Belussi, Danza, Ghellere, Guazzi, Meroni & Salamone (2017); Mutani, Delmastro, Gargiulo & Corgnati (2016)
	B.2.2.) física	estatística, GIS, caracterização física (EnergyPlus, Combined Energy Simulation And Retrofitting (CESAR), ArcGIS, Meteororm, Design Builder, Google Earth, Streetview, Microsoft Bing Bird View, Digital Elevation Models, ferramentas baseadas no GIS, ESRI-ArcInfo software, IDA-ICE 4.2 e ferramenta de modelação baseada em MS Excel (REMA))	dinâmico	avaliação do desempenho energético e necessidades de energia e desenvolvimento de estratégias de melhoramento do desempenho energético	Wang, Landolt, Mavromatidis, Orehounig & Carmeliet (2018); Theodoridou, Papadopoulos & Hegger (2011)
	B.3.) híbrido	algoritmia, GIS, estatística (MATLAB, Boxplot, Meteororm 7.0, ferramentas baseadas no GIS)	simplificado	facilitar a avaliação de medidas potenciais de eficiência energética e desenvolver um índice de desempenho energético	Fonseca & Schlueter (2015); Moussaoui, Cherrared, Kacimi & Belarbi (2017)

Conforme a abordagem aplicada, são associados vários tipos de modelos de metodologia: econométrico e tecnológico para a abordagem “*top-down*” e estatístico, físico e híbrido para a abordagem “*bottom-up*”:

1. Modelo econométrico: foca-se na utilização de variáveis de decisão relacionadas com o custo e as receitas provenientes dos vários cenários (Swan & Ugursal, 2009);
2. Modelo tecnológico: recorre a dados característicos do parque edificado habitacional para determinar o consumo energéticos dos edifícios (Swan & Ugursal, 2009);
3. Modelo estatístico: baseia-se na utilização de dados históricos e de técnicas de regressão para estimar o consumo de energia de diversas finalidades de energia de habitações representativas do parque edificado habitacional, apresentando uma certa debilidade aquando da avaliação de um elevado número de cenários de conservação de energia (Kavgic et al., 2010; Swan & Ugursal, 2009);
4. Modelo físico: recorre a uma combinação de características físicas de amostras do parque edificado habitacional, tal como os dados geométricos, características térmicas, localização geográfica e outros, e de dados empíricos provenientes de inquéritos habitacionais e de outros conjuntos de dados. Este modelo tem o potencial para avaliar a eficiência de políticas relacionadas com o impacto das emissões de carbono e do desempenho energético dos edifícios em geral (Kavgic et al., 2010);
5. Modelo híbrido: baseia-se na combinação do modelo estatístico com o modelo físico para estimar o consumo energético para cada uma das finalidades de energia.

Após a elaboração da tabela resumo ter sido concluída, constatou-se que havia metodologias que expressavam diferenças na forma como os estudos foram desenvolvidos, apesar de se apoiarem no mesmo tipo de modelo. Por essa mesma razão, foi despoletada a necessidade de criar outra tabela que identificasse os parâmetros que permitem distinguir não só as metodologias apoiadas pelo mesmo tipo de modelo, mas também por tipos de modelos distintos (Tabela 6). A título de exemplo, o tipo de modelo tecnológico (A.2.1), em comparação com o modelo tecnológico (A.2.2), apresenta diferenças na forma como é calculado o desempenho energético e na finalidade do modelo, enquanto que, no caso do modelo econométrico, relativamente ao modelo híbrido, estes podem apresentar várias diferenças metodológicas, embora se distingam pelo tipo de abordagem utilizada.

Tabela 6 – Excerto da tabela de identificação de parâmetros de comparação entre os tipos de modelos

Tabela de identificação de parâmetros distintos entre tipos de modelos							
	A.1.) econométrico	A.2.1.) tecnológico	B.1.1.) estatístico	B.1.2.) estatístico	B.2.1.) física	B.2.2.) física	B.3.) híbrido
A.1.) econométrico		tipo de modelo	tipo de abordagem	tipo de abordagem	tipo de abordagem	tipo de abordagem	tipo de abordagem
A.2.1.) tecnológico	tipo de modelo		tipo de abordagem	tipo de abordagem	tipo de abordagem	tipo de abordagem	tipo de abordagem
B.1.1.) estatístico	tipo de abordagem	tipo de abordagem		método de cálculo do desempenho energético	tipo de modelo	tipo de modelo	tipo de modelo
B.1.2.) estatístico	tipo de abordagem	tipo de abordagem	método de cálculo do desempenho energético		tipo de modelo	tipo de modelo	tipo de modelo
B.2.1.) física	tipo de abordagem	tipo de abordagem	tipo de modelo	tipo de modelo		método de cálculo do desempenho energético	tipo de modelo
B.2.2.) física	tipo de abordagem	tipo de abordagem	tipo de modelo	tipo de modelo	método de cálculo do desempenho energético		tipo de modelo
B.3.) híbrido	tipo de abordagem	tipo de abordagem	tipo de modelo	tipo de modelo	tipo de modelo	tipo de modelo	

### 3. METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ESCALA NA RENTABILIDADE DAS INTERVENÇÕES DE REABILITAÇÃO DO EDIFICADO, COM O OBJETIVO NZEB

Neste capítulo é definida a metodologia utilizada neste estudo para apoiar o cálculo da rentabilidade de um conjunto de edifícios. A metodologia inclui a seleção do caso de estudo e a adaptação de uma metodologia de avaliação de desempenho energético para um grupo de edifícios, nomeadamente através da representatividade de uma tipologia existente, que permita obter uma extrapolação coerente dos resultados de implementação de medidas de melhoria para a totalidade dos edifícios no caso de estudo.

#### 3.1 Definição e análise da metodologia para avaliação do efeito de escala na rentabilidade de intervenções de reabilitação

Com o intuito de selecionar uma metodologia capaz de satisfazer os objetivos do estudo pretendidos e compatível com os requisitos impostos no contexto nacional, foi realizada uma revisão de literatura referente aos métodos de avaliação (subcapítulo 2.4.1) e aos tipos de abordagens existentes (subcapítulo 2.4.2). Reunidos todos os dados necessários na Tabela 5 e na Tabela 6, foi então selecionada como adequada para adaptação a este estudo, a metodologia utilizada na investigação de Albatici, Gadotti, Baldessai, & Chiogna (2016).

Esta metodologia, apesar de ter sido aplicada, no caso do artigo científico anteriormente mencionado, em Itália, pode ser implementada noutros locais geográficos e também pode ser ajustada à escala pretendida, em consequência da sua sistematização. De uma forma geral, esta pretende, através de uma análise estatística, caracterizar o grupo de edifícios, quanto à localização geográfica, tipologia, elementos de construção, sistemas e seus desempenhos energéticos, com a intenção de identificar um edifício representativo para cada uma das tipologias de construção.

A metodologia utilizada neste estudo é estruturada em 6 fases de desenvolvimento, todas elas essenciais para um bom funcionamento da metodologia e para a obtenção dos melhores resultados possíveis. As 6 fases de metodologia são as seguintes (Figura 17):

1. Levantamento e caracterização dos edifícios;
2. Definição da tipologia representativa;
3. Avaliação do desempenho energético do edifício existente;
4. Escolha das medidas de melhoria;
5. Rentabilidade (aplicação da metodologia de custo ótimo);
  - 5.1. Avaliação do desempenho energético e energia primária;
  - 5.2. Custo global;
6. Alteração de pressupostos para grupo de edifícios.

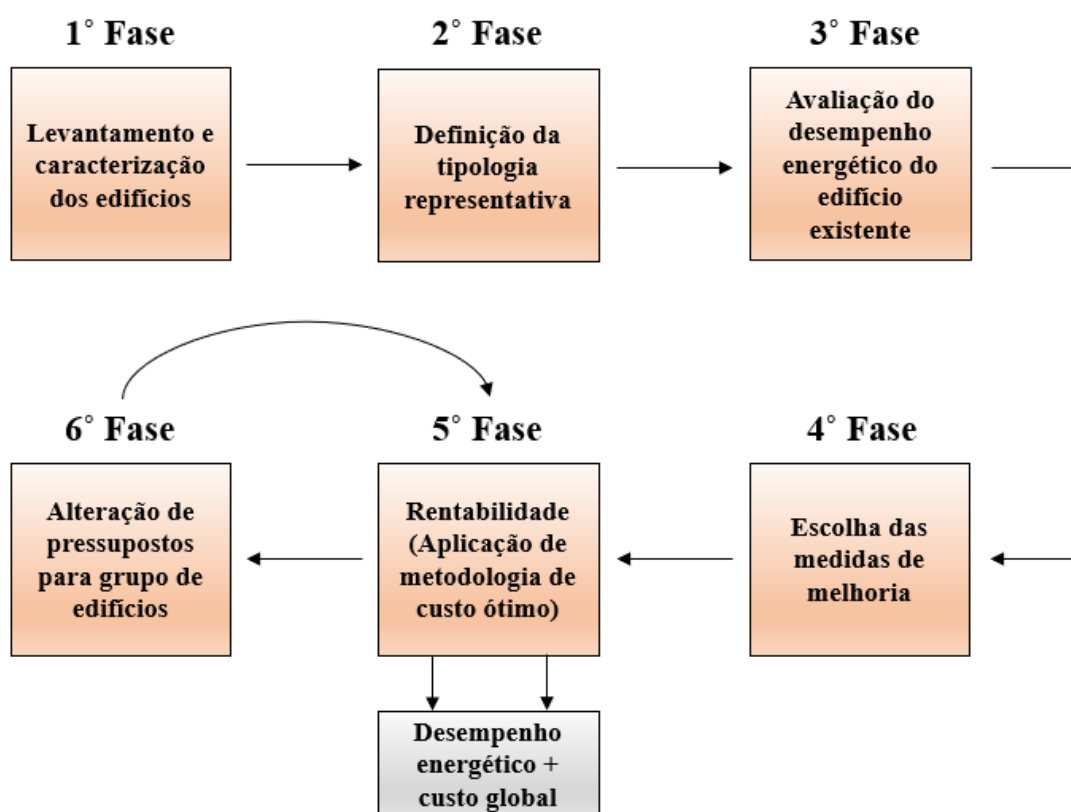


Figura 17 - Estrutura da metodologia

Nos subcapítulos seguintes é explicado, de uma forma mais detalhada, o que se sucede em cada uma destas fases.

### 3.1.1 Levantamento e caracterização dos edifícios

O primeiro passo desta metodologia consistiu na escolha do grupo de edifícios a introduzir no estudo e posterior caracterização do mesmo. De modo a facilitar a caracterização do edificado, a escolha recaiu para a seleção de grupos de edifícios com características similares, como é o caso de bairros sociais. Esta escolha é também coerente do ponto de vista do estudo de medidas de melhoria para os edifícios, visto que uma parte significativa destes edifícios em Portugal, se encontram num estado de degradação elevado.

Cada um dos edifícios do grupo de edifícios deve ser caracterizado quanto à orientação da fachada, o número de pisos e as tipologias existentes.

Para além disso, deve ser elaborada uma caracterização construtiva dos seguintes elementos construtivos e sistemas técnicos do edificado:

1. Paredes exteriores e interiores;
2. Pavimentos exteriores;
3. Vãos envidraçados exteriores;
4. Cobertura (caso necessário);
5. Equipamentos para aquecimento;
6. Equipamentos para arrefecimento;
7. Equipamentos para AQS.

Tais caracterizações devem ser suportadas por dados do projeto de construção do edificado e ainda, caso os dados relativos aos elementos de construção e sistemas técnicos sejam inconclusivos ou inexistentes, complementadas por soluções comumente utilizadas no período de construção do mesmo.

### 3.1.2 Definição da tipologia representativa

Para que a tipologia representativa possa ser identificada, de acordo com a metodologia descrita em Albatrici et al. (2016), deve ser realizada uma análise estatística ao projeto existente, tendo em consideração as peças desenhadas existentes e possíveis de serem consultadas. Nessa análise devem ser obtidas as quantidades de frações com uma determinada tipologia e posição relativa (cave, piso térreo, piso intermédio ou último piso). Com uma observação meticulosa dos dados obtidos, é possível identificar qual a tipologia e a posição relativa com maior representação dentro do grupo de edifícios. Para a identificação da tipologia representativa, é essencial que seja elaborada uma análise dimensional da mesma. Nesta análise devem ser recolhidos dados relativos à área, ao pé direito, à percentagem de área e ao volume dos apartamentos existentes.

De seguida, deve ser identificado em que edifício é manifestada uma maior presença desta determinada tipologia e posição relativa, estipuladas anteriormente. Nesse sentido, a caracterização do edificado existente, elaborada no subcapítulo 3.1.1, deve ser consultada.

Tendo determinado a tipologia e a posição relativa com maior representação e ainda em que edifício estes dados são mais frequentes, pode ser identificada a tipologia representativa. Para tal, uma das frações do edifício identificado é selecionada, com correspondência à tipologia e à posição relativa estipuladas.

### 3.1.3 Avaliação do desempenho energético do edifício existente

Para a avaliação do desempenho energético da tipologia representativa, foi escolhido o método quase-estacionário conforme utilizado na regulamentação nacional relativamente a edifícios residenciais. Por motivos de legislação e contexto nacional, procedeu-se à utilização da metodologia definida no Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), para o desenvolvimento deste estudo. Este regulamento surge com o intuito de reforçar a melhoria do comportamento térmico dos edifícios habitacionais e a eficiência dos seus sistemas técnicos, através do cálculo das necessidades energéticas e posterior comparação com os requisitos definidos na Portaria 319/2016 (Ministério da Economia, 2016).



O desempenho energético da tipologia representativa é avaliado com recurso a uma folha de cálculo do MS Excel, fornecida pela ITeCons (ITeCons, 2013). Esta ferramenta de cálculo opera em função da introdução dos seguintes parâmetros:

1. Localização geográfica: introdução de dados relativos à morada, coordenadas GPS e natureza de emissão de certificado;
2. Identificação do imóvel: introdução de dados relativos à identificação do tipo de imóvel, à identificação de registro, fiscal e municipal, ao proprietário do imóvel e ainda ao técnico responsável pelo projeto e obra;
3. Características do imóvel: introdução de dados relativos à localização do imóvel, características do edifício (ano de construção, tipo de utilização, nº de pisos) e características da fração (área útil de pavimento, pé-direito, tipologia, inércia térmica, nº de pisos da fração e situação da fração face a outras frações);
4. Levantamento dimensional: introdução de dados relativos à área, pé direito, percentagem de área e volume de cada uma das divisões e ainda no total;
5. Envolvente exterior: introdução de dados relativos à identificação e caracterização de paredes exteriores, pavimentos exteriores e coberturas exteriores (Valor de U e área das soluções e pontes térmicas planas) e ainda de vãos envidraçados exteriores ( $U_{\text{wdn}}$ ,  $g_{\perp,vi}$ ,  $g_{\perp,T}$ ,  $g_{\perp,Tp}$ , classe de caixilharia, tipo de vidro e área de envidraçado, orientação e permeabilidade de caixa de estore de cada divisão);
6. Envolvente em contacto com o solo: introdução de dados relativos à condutibilidade térmica do solo, identificação e caracterização de pavimentos térreos, enterrados e paredes enterradas (área, perímetro exposto, espessura da parede exposta e profundidade) e ainda de pontes térmicas lineares exteriores (tipo de ligação entre elementos, comprimento B, método de cálculo e sistema de isolamento nas paredes);
7. Envolvente interior: introdução de dados relativos à definição da envolvente interior (espaços não-úteis, método de cálculo do  $b_{tr}$ , valor do  $b_{tr}$ ,  $A_i/A_u$ , volume do ENU e nível de ventilação), identificação e caracterização de paredes interiores, pavimentos interiores (U, ENU e área), de coberturas interiores (U, ENU, área, cor da cobertura exterior, grau de ventilação, emissividade e  $U_{\text{descendente}}$ ), de vãos envidraçados interiores (tipo de janela, solução e proteção,  $U_{\text{wdn}}$ ,

localização, ENU, área, orientação e tipo de vidro) e ainda de pontes térmicas lineares interiores (tipo de ligação entre elementos, comprimento B, método de cálculo do  $b_{tr}$  e sistema de isolamento nas paredes);

8. Ventilação: introdução de dados relativos ao método de cálculo, sistema de ventilação,  $R_{ph}$  e descrição da solução de ventilação;
9. Sistemas técnicos, sendo que o cálculo considera sistemas por defeito.

Note-se que a introdução de dados relativos a cada um dos parâmetros deve ser realizada pela ordem identificada.

Com a introdução dos dados característicos da tipologia tipo efetivada, foram calculadas as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento ( $N_{ic}$ ), arrefecimento ( $N_{vc}$ ) e preparação de água quente sanitária ( $N_{ac}$ ). O valor das necessidades nominais anuais globais de energia primária ( $N_{tc}$ ) foi determinado através da equação (3.1).

$$N_{tc} = \frac{N_{ic} \times c_i}{\eta_i} + \frac{N_{vc} \times c_v}{\eta_v} + \frac{N_{ac} \times c_a}{\eta_a} \quad (3.1)$$

Em que:

$c_i$  - Fator de conversão de aquecimento;

$c_v$  - Fator de conversão de arrefecimento;

$c_a$  - Fator de conversão de preparação de água quente sanitária;

$\eta_i$  - Eficiência do equipamento de aquecimento;

$\eta_v$  - Eficiência do equipamento de arrefecimento;

$\eta_a$  - Eficiência do equipamento de preparação de água quente sanitária.

O valor de  $N_{tc}$  é o que define o nível de desempenho energético da tipologia tipo, isto graças à sua integração na metodologia como indicador de desempenho energético.

Relativamente às medidas de fornecimento de energia proveniente de fontes renováveis e para o cálculo da energia primária, o valor de energia proveniente de fontes renováveis produzida foi subtraído ao valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, arrefecimento ou AQS, consoante o tipo de fonte de energia renovável utilizado.

A integração de energia proveniente de fontes renováveis pode ser concretizada através da introdução de caldeiras de biomassa, coletores solares e painéis fotovoltaicos. As caldeiras de biomassa suprem as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento e preparação de água quente sanitária, enquanto que os coletores solares térmicos suprem apenas as necessidades nominais anuais de energia útil para preparação de água quente sanitária e por fim, os painéis fotovoltaicos suprem as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento e arrefecimento, dependendo, obviamente, de o equipamento utilizado permitir o uso da energia elétrica para este fim.

A energia produzida a partir de painéis fotovoltaicos foi determinada com o auxílio do *software* “PVGIS” (European Commission, 2012) e a energia produzida a partir de coletores solares térmicos foi determinada através do *software* “SCE.ER” (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2018) (Figura 18).

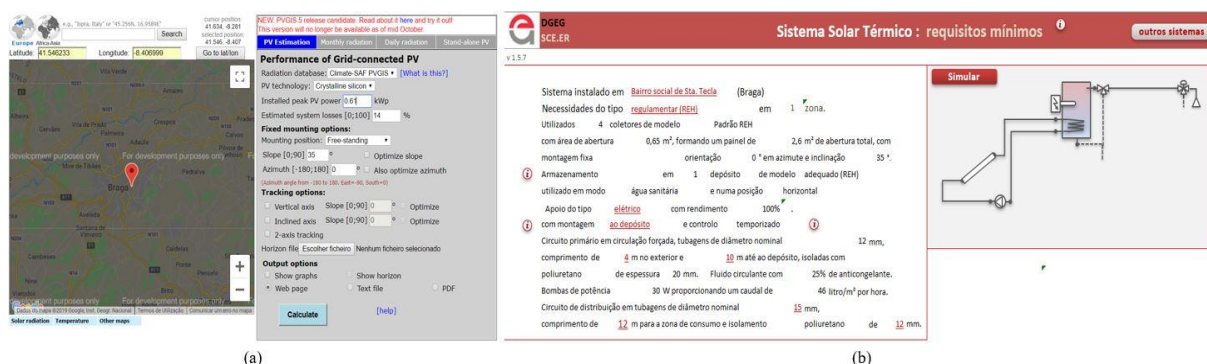


Figura 18 - PVGIS (a); SCE.ER (b) (Fontes: European Commission, 2012; Direção-Geral de Energia e Geologia, 2018)

### 3.1.4 Escolha das medidas de melhoria

Esta fase é iniciada pela seleção de medidas de melhoria da envolvente exterior e de sistemas técnicos mais eficientes para a tipologia representativa, tendo em atenção que os sistemas técnicos selecionados como medidas de melhoria apenas são aplicados para os pacotes de reabilitação, que serão constituídos a partir dos resultados obtidos para as medidas isoladas.

Tais medidas podem incluir a renovação das paredes exteriores, dos vãos envidraçados, das coberturas, dos pavimentos e dos sistemas técnicos, dependendo da influência de cada um destes elementos para o desempenho térmico e energético da tipologia representativa. Aquando da seleção destas medidas, deve-se ter em conta soluções regularmente utilizadas no contexto nacional (ITeCons, 2012), assim como a existência de alguma variedade de soluções em cada um dos elementos construtivos e sistemas

técnicos adotados. O desempenho das medidas de melhoria isoladas foi calculado tendo em consideração os sistemas técnicos padrão do REH.

O segundo passo desta fase, apenas é iniciado após o cálculo do desempenho energético e rentabilidade das medidas isoladas e consiste na elaboração de pacotes de intervenção, constituídos pelos sistemas técnicos determinados e pelas medidas de envolvente que cumpram os seguintes critérios:

1. Solução de envolvente com melhor desempenho energético;
2. Solução de envolvente de custo ótimo;
3. Solução de envolvente com menores custos de exploração;
4. Solução corrente.

Para atribuir uma maior variedade de soluções de envolvente exterior aos pacotes de reabilitação, é selecionada a solução com menores custos de exploração e uma solução corrente. A solução com menores custos de exploração será integrada por ser a solução que ao longo do período de vida útil do edifício (30 anos no caso da reabilitação) gera maiores poupanças no somatório dos custos de energia, manutenção, operação e ainda, para o caso de uma análise numa perspetiva social, dos custos das emissões de gases com efeito de estufa. Por fim, a solução corrente será integrada por ser considerada uma solução comumente utilizada num contexto nacional (ITeCons, 2012).

Para a seleção das medidas de melhoria da envolvente, o gerador de preços CYPE (CYPE Ingenieros, 2013) foi utilizado para determinar os preços unitários e de manutenção de diversas soluções. Por outro lado, a seleção das tecnologias a implementar e seus custos foram executados com o auxílio de catálogos e tabelas de preços disponibilizadas por empresas focadas na produção e venda destes equipamentos e sistemas, tais como a Daikin, a Vulcano, a Mitsubishi, entre outras.

### 3.1.5 Rentabilidade

Quanto à avaliação do nível de rentabilidade, a metodologia desenvolvida neste estudo recorre-se da metodologia de custo ótimo definida pelo Regulamento Delegado 244/2012 (Comissão Europeia, 2012). A introdução da metodologia de custo ótimo permite avaliar cada uma das medidas de melhoria consoante o consumo de energia primária e os custos globais, numa perspetiva social e/ou privada, sendo que esta é aplicada com o auxílio de uma folha de cálculo de MS Excel.

A respeito da determinação dos custos globais, a metodologia de custo ótimo considera duas perspectivas diferentes. No caso da perspectiva privada, são incluídos os custos de investimento, de energia, de manutenção e operação de cada uma das medidas de melhoria isoladas enquanto que, no caso da perspectiva social, os custos de emissão de CO<sub>2</sub> também são compatibilizados.

Neste seguimento, os custos globais respeitantes aos edifícios e seus componentes (perspetiva privada) são calculados através da equação (3.2) (Comissão Europeia, 2012).

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (3.2)$$

Em que:

$\tau$  - Período de cálculo

$C_g(\tau)$  - Custo global (relativo ao ano inicial  $\tau_0$ ) no período de cálculo;

$C_I$  - Custos de investimento inicial para a medida ou conjunto de medidas  $j$ ;

$C_{a,i}(j)$  - Custo anual no ano  $i$  para a medida ou conjunto de medidas  $j$ ;

$V_{f,\tau}(j)$  - Valor residual da medida ou conjunto de medidas  $j$  no final do período de cálculo

(em relação ao ano inicial  $\tau_0$ );

$R_d(i)$  - Fator de desconto para o ano  $i$ , com base na taxa de desconto  $r$  a calcular da equação (3.3).

$$R_d(p) = \left( \frac{1}{1 + r/100} \right)^p \quad (3.3)$$

Sendo  $p$  o número de anos a partir do período inicial e  $r$  a taxa de desconto real.

Já quanto ao cálculo dos custos globais numa perspectiva social, é apresentada a equação (3.4).

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (3.4)$$

Em que:

$C_{c,i}(j)$  - Custo do carbono para a medida ou conjunto de medidas  $j$  durante o ano  $i$ .

Por fim, com conhecimento do desempenho energético e dos custos globais, é possível avaliar o nível de rentabilidade de cada uma das medidas de melhoria isoladas com recurso a um gráfico de relação custo/consumo. Na Figura 19 é apresentado um exemplo de um gráfico genérico do resultado dos

cálculos com recurso à metodologia de custo-ótimo, onde cada um dos pontos representa um possível cenário de reabilitação, comparado com a reabilitação de referência, e que define o limite da rentabilidade da intervenção. Todos os cenários de reabilitação dispostos abaixo do limite de rentabilidade, são consideradas soluções rentáveis, enquanto que aquelas dispostas acima do limite de rentabilidade são consideradas não rentáveis. Importa ainda referir que o cenário de reabilitação com rentabilidade positiva e com menos custos globais é classificado de solução de custo-ótimo.

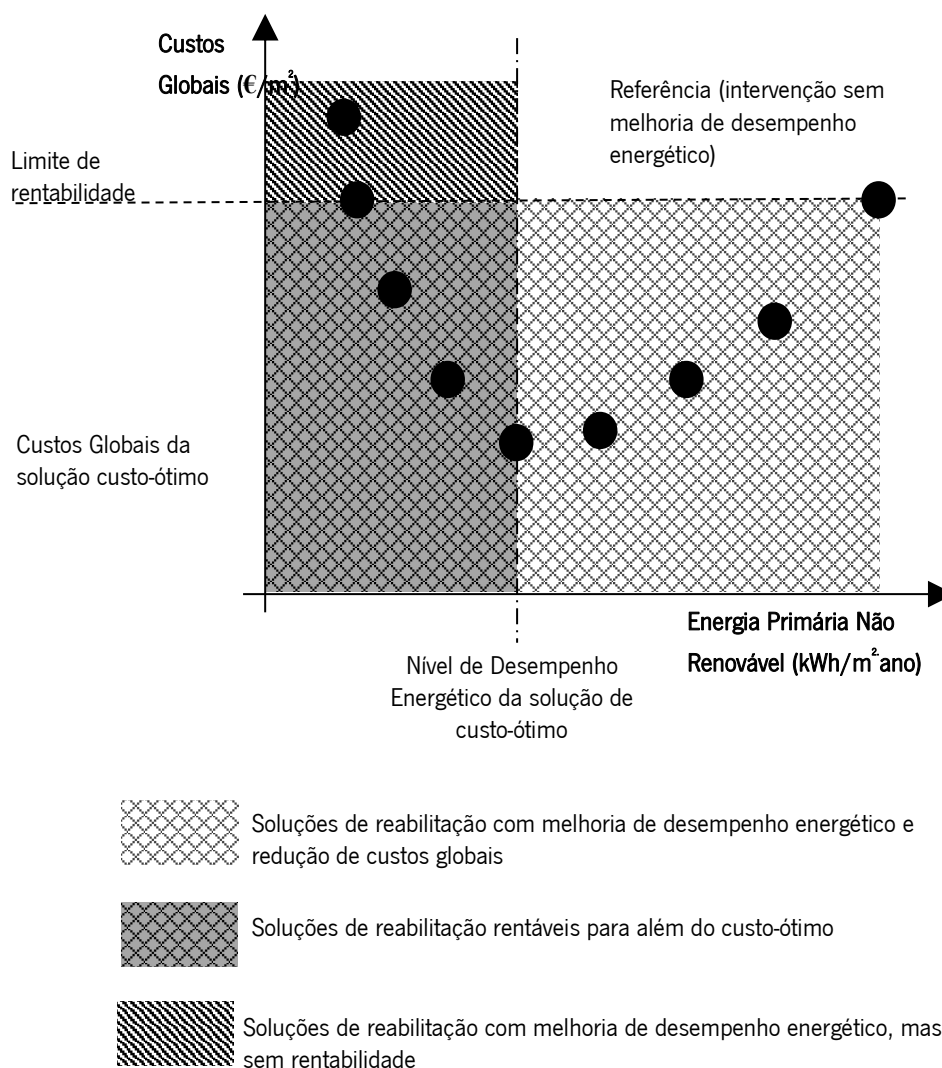


Figura 19 - Gráfico genérico de resultados de análise de custo-ótimo (Fonte: Almeida & Ferreira, 2017)

Conforme descrito na secção 3.1.4, no âmbito desta metodologia, é calculada numa primeira fase, a rentabilidade de medidas de melhoria isoladas e posteriormente, numa lógica de intervenção integrada, as medidas são agregadas em pacotes de intervenção com os vários sistemas técnicos, sendo que a abordagem a tomar para o cálculo da rentabilidade é semelhante.

### 3.1.6 Alteração de pressupostos para grupo de edifícios

Na última etapa da metodologia utilizada neste estudo, os resultados obtidos relativamente à rentabilidade dos pacotes de intervenção à escala do edifício, utilizando a tipologia representativa, devem ser extrapolados para o grupo de edifícios. Tal conversão é processada através da atribuição da tipologia tipo e das suas características a todos os edifícios pertencentes ao grupo de edifícios.

Para determinar os níveis de rentabilidade de cada um dos pacotes de reabilitação do bairro social, a metodologia de custo ótimo deve ser aplicada com uma linha de desenvolvimento igual à usada nos pacotes de reabilitação da tipologia representativa. No entanto, para a consideração do efeito de escala, são introduzidas as seguintes alterações:

1. Mudança de equipamentos/sistemas técnicos de edifícios unifamiliares para equipamentos/sistemas técnicos de edifícios multifamiliares e possível alteração da eficiência de equipamentos;
2. Alteração de quantidades de equipamentos/sistemas técnicos;
3. Aplicação de economias de escala nas soluções de envolvente;

Tendo corrigido os valores das necessidades nominais anuais globais de energia primária e definido as alterações a implementar para o grupo de edifícios, segue-se a determinação dos níveis de rentabilidade de cada um dos pacotes de reabilitação. Note-se que este processo de avaliação é o mesmo processo realizado para as medidas de melhoria isoladas e pacotes de reabilitação. Desta forma, os custos totais globais e os valores das necessidades nominais anuais globais de energia primária são calculados e pode ser realizada uma avaliação dos níveis de rentabilidade de cada um dos pacotes de reabilitação, em comparação com o cenário de referência, através de um gráfico como o da Figura 19.

Chegando ao ponto em que são conhecidos os resultados dos níveis de rentabilidade dos pacotes de reabilitação da tipologia representativa e do grupo de edifícios, deve ser feita uma análise de ambos os resultados obtidos. Deste modo, os resultados ao nível da tipologia representativa e do grupo de edifícios, podem ser comparados e analisados para posterior identificação das potenciais vantagens, provenientes do efeito de escala.

## 4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DEFINIDA AO CASO DE ESTUDO

Este capítulo corresponde à fase de teste da metodologia adaptada ao grupo de edifícios, integrando um caso de estudo como exemplo. Durante esta fase, são também identificados e explicados todos os passos necessários para a obtenção dos níveis de rentabilidade das medidas de melhoria.

### 4.1 Levantamento e caracterização dos edifícios

O caso de estudo escolhido para este projeto foi o bairro social de Santa Tecla, localizado em Braga. Este bairro encontra-se num estado de degradação elevado e por esse motivo, está em vista um projeto de requalificação de todo o bairro e área em redor do mesmo, protagonizado pela BragaHabit – Empresa Municipal de Habitação de Braga.

O bairro social de Santa Tecla, construído em 1979, é constituído por 178 fogos habitacionais distribuídos por quatro blocos multifamiliares (Figura 20).



*Figura 20 - Distribuição dos blocos habitacionais do bairro de Santa Tecla*



Na Tabela 7 é apresentada a orientação da fachada principal, o número de pisos e o número de fogos habitacionais por tipologia de cada um dos blocos habitacionais.

*Tabela 7 - Características dos blocos habitacionais*

Blocos	Orientação Fachada Principal	Nº Pisos	Nº T2	Nº T3	NºT4	Nº Fogos
1	Sul	4	-	24	24	48
2	Sudoeste	4/5	15	23	8	46
3	Sudoeste	4/5	25	34	9	68
4	Sudeste	4	8	8	-	16

A caracterização construtiva do edificado foi feita através de informações fornecidas pela BragaHabit e complementada pela seleção de soluções construtivas e sistemas técnicos frequentemente utilizados no fim da década de 70.

Na Tabela 8 são apresentadas as diversas soluções construtivas com a caracterização térmica. Na Tabela 9, são descritos os sistemas que se consideraram como padrão para a caracterização térmica das frações, conforme o regulamento nacional.

*Tabela 8 - Descrição e caracterização térmica dos elementos construtivos* (Fontes: Santos & Matias, 2006; Ministério da Economia e do Emprego, 2013c)

Solução	Descrição	U (W/m <sup>2</sup> .°C)
Paredes Exteriores	Parede exterior dupla com 28 cm de espessura, constituída por dois panos de tijolo cerâmico corrente de 11 cm de espessura, com caixa de ar de 4 cm e com reboco tanto pelo exterior como pelo interior com 1 cm de espessura	1,10
Paredes Interiores	Parede interior simples com 13 cm de espessura, constituída por tijolo cerâmico corrente de 11 cm de espessura e com reboco tanto pelo exterior como pelo interior com 1 cm de espessura	1,96
Pavimento Exterior	Pavimento aligeirado com 20 cm de espessura	1,85
Vãos Envidraçados Exteriores	Vão envidraçado exterior de 90x110 (cm <sup>2</sup> ), com caixilharia de madeira, dois vidros simples e com estores exteriores em PVC	4,30

*Tabela 9 - Descrição de sistemas técnicos padrão adotados no REH*

Solução	Descrição
Equipamento para Aquecimento	Aquecedor Elétrico (100%)
Equipamento para AQS	Aquecedor a gás ( $\eta=75\%$ )
Equipamento para Arrefecimento	<i>Multisplit</i> (EER=2,8)

Na Figura 21 podem ser observadas algumas fotografias exteriores do bairro de Santa Tecla, em Braga.



*Figura 21 - Fotografias exteriores do Bairro de Santa Tecla*

## 4.2 Definição da tipologia representativa

Após serem conhecidos os dados e informações relevantes para o desenvolvimento da metodologia, segue-se o desenvolvimento de uma análise para descobrir qual a tipologia mais representativa.

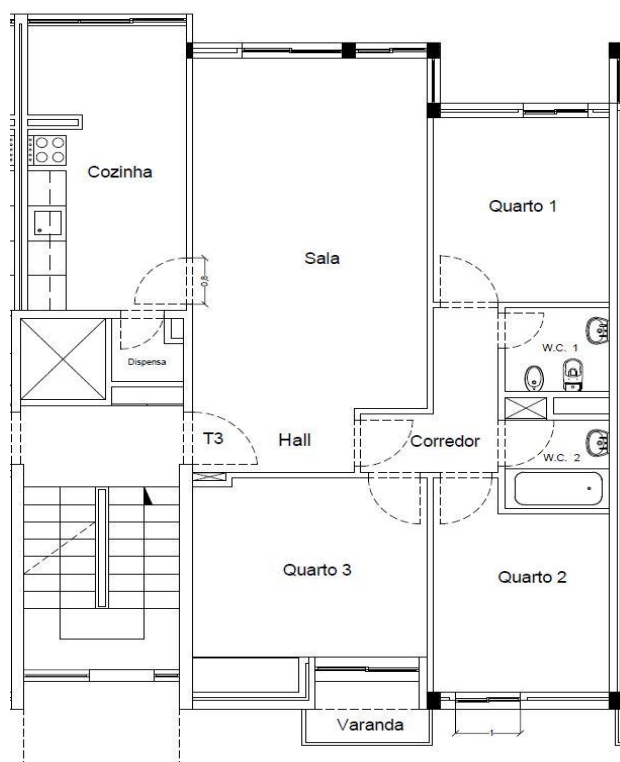
No sentido de identificar a tipologia representativa, foram analisados os dados referentes às tipologias existentes nos 20 edifícios pertencentes ao bairro, incluindo a posição relativa de cada uma das frações pertencentes a uma tipologia. O resultado obtido na análise da tipologia representativa pode ser visualizado na Tabela 10.

*Tabela 10 - Tabela de análise de frações existentes*

	Cave	Piso térreo	Pisos intermédios	Último piso
<b>T2</b>	8	10	20	10
<b>T3</b>	9	20	<b>40</b>	20
<b>T4</b>	1	10	20	10

Diante dos resultados apresentados, é possível identificar que a tipologia representativa é a tipologia T3 com uma posição relativa de pisos intermédios. Neste momento, resta apenas determinar em que bloco existe uma maior representação desta tipologia. Nesse sentido, observando a Tabela 7, é possível constatar-se que o bloco 3 é o que possui maior número de frações com tipologia T3.

Tendo chegado ao ponto em que a tipologia representativa já foi definida, segue-se a descrição da mesma. Inicialmente, é apresentada, na Figura 22, a planta da tipologia representativa, onde se pode observar as diferentes divisões.

*Figura 22 - Planta da tipologia representativa*

A análise dimensional da tipologia representativa é retratada na Tabela 11, sendo o pé-direito da fração de 2,5 m.

*Tabela 11 - Análise dimensional da tipologia representativa*

Divisão	Área (m <sup>2</sup> )	Pé Direito (m)	% Área	Volume (m <sup>3</sup> )
Cozinha	11,84	2,50	15,30	29,61
Sala	21,78		28,10	54,46
W.C. 1	2,32		3,00	5,80
W.C. 2	2,69		3,50	6,74
Quarto 1	8,57		11,00	21,42
Quarto 2	8,93		11,50	22,32
Quarto 3	12,05		15,50	30,12
Varanda	1,85		2,40	4,63
Hall de Entrada	2,57		3,30	6,42
Corredor	3,96		5,10	9,90
Despensa	1,06		1,40	2,66
Total	77,63		100,00	194,06

#### 4.3 Avaliação do desempenho energético do edifício existente

Recolhidos os dados referentes à caracterização geométrica construtiva e térmica do edificado e seus elementos e ainda à análise dimensional da tipologia representativa, é possível determinar o consumo de energia da intervenção de referência. Para tal, foi implementada a metodologia de cálculo definida pelo REH.

Como resultado da aplicação do REH, surgem os dados apresentados na Tabela 12.

*Tabela 12 - Tabela de cálculo das necessidades nominais anuais globais de energia primária da intervenção de referência*

Variante	Necessidades de Energia (kWh/m².a)						
Referência	Nic	$\eta$	Nvc	$\eta$	Nac	$\eta$	Ntc
	71,10	1,00	2,00	3,00	35,82	0,71	265,40

De entre os resultados obtidos na Tabela 12, realçam-se as elevadas necessidades energéticas para aquecimento dos espaços durante o inverno (71,10 kWh/m².a) e as diminutas necessidades energéticas para arrefecimento dos espaços durante o verão (2,00 kWh/m².a). A fração definida como tipologia representativa apresenta necessidades de energia primária de 265,40 kWh/m².a.

#### 4.4 Escolha das medidas de melhoria

O próximo passo consiste na seleção das medidas de reabilitação, implementadas ao nível da envolvente exterior e dos sistemas técnicos, incluindo a incorporação de sistemas de aproveitamento de fontes renováveis.

No que toca à envolvente exterior, apenas são intervencionadas as paredes exteriores e os vãos envidraçados, isto porque a fração em estudo posiciona-se num piso intermédio. Nesse sentido, tanto a cobertura como o pavimento não influenciam o desempenho energético da tipologia.

Quanto aos sistemas técnicos, são selecionados vários equipamentos para cada uma das finalidades de energia: aquecimento dos espaços, arrefecimento dos espaços e aquecimento das águas sanitárias. Note-se que as medidas de melhoria de sistemas técnicos apenas são implementadas nos pacotes de reabilitação.

Na Tabela 13 e na Tabela 14 são apresentadas as 18 soluções selecionadas para as paredes exteriores, sendo que 9 delas recorrem ao sistema ETICS e as restantes 9 ao sistema de fachada ventilada. Tanto num sistema como no outro, foram utilizados 3 materiais de isolamento térmico distintos (poliestireno expandido (EPS), lã mineral (LM) e aglomerado de cortiça natural expandida (ACE)) e ainda 3 espessuras para cada material de isolamento, com a finalidade de proporcionar uma maior variedade de escolha em termos de desempenho térmico e custo.

Tabela 13 - Medidas de melhoria para paredes exteriores (ETICS)

<b>Paredes Exteriores</b>									
<b>Tipo de solução</b>	<b>Solução ETICS</b>								
<b>Variante</b>	<b>Var1</b>	<b>Var2</b>	<b>Var3</b>	<b>Var4</b>	<b>Var5</b>	<b>Var6</b>	<b>Var7</b>	<b>Var8</b>	<b>Var9</b>
<b>Isolamento térmico</b>	EPS	EPS	EPS	LM	LM	LM	ACE	ACE	ACE
<b>Espessura isolamento (mm)</b>	60	90	120	40	80	120	40	80	120
<b>U (W/m².°C)</b>	0,25	0,21	0,18	0,29	0,22	0,18	0,29	0,23	0,18
<b>Custo de manutenção anual (€/ano)</b>	0,52	0,58	0,64	0,56	0,72	0,88	0,65	0,86	1,10
<b>Preço unitário (€/m²)</b>	66,30	74,10	82,60	72,20	91,90	112,80	82,90	110,20	140,80

Tabela 14 - Medidas de melhoria para paredes exteriores (Fachada Ventilada)

<b>Paredes Exteriores</b>									
<b>Tipo de solução</b>	<b>Solução Fachada Ventilada</b>								
<b>Variante</b>	<b>Var10</b>	<b>Var11</b>	<b>Var12</b>	<b>Var13</b>	<b>Var14</b>	<b>Var15</b>	<b>Var16</b>	<b>Var17</b>	<b>Var18</b>
<b>Isolamento térmico</b>	EPS	EPS	EPS	LM	LM	LM	ACE	ACE	ACE
<b>Espessura isolamento (mm)</b>	60	90	120	40	80	120	40	80	120
<b>U (W/m².°C)</b>	0,28	0,21	0,17	0,25	0,21	0,18	0,29	0,22	0,18
<b>Custo de manutenção anual (€/ano)</b>	1,34	1,39	1,46	1,39	1,46	1,54	1,34	1,39	1,46
<b>Preço unitário (€/m²)</b>	92,40	96,00	100,90	97,60	103,00	108,50	114,70	139,60	166,60

A determinação do custo de manutenção anual e do preço unitário foi efetuada com recurso ao gerador de preços do CYPE (CYPE Ingenieros, 2013), enquanto que o cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U) foi realizado com o auxílio da equação (4.1).

$$U = \frac{1}{R_{se} + R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i} \text{ (W/m}^2\text{.}^\circ\text{C)} \quad (4.1)$$

Em que:

$R_{se}$  - Resistência térmica superficial exterior ( $\text{m}^2\text{.}^\circ\text{C/W}$ );

$R_{si}$  - Resistência térmica superficial interior ( $\text{m}^2\text{.}^\circ\text{C/W}$ );

$R_i$  - Resistência térmica da camada i ( $\text{m}^2\text{.}^\circ\text{C/W}$ ).

A resistência térmica da camada i pode ser determinada através da equação (4.2).

$$\sum_{i=1}^n R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (4.2)$$

Em que:

$e_i$  - Espessura da camada i (m);

$\lambda_i$  - Condutibilidade térmica da camada i ( $\text{W/m.}^\circ\text{C}$ )

Com o conhecimento das espessuras das camadas e seus materiais incorporados é possível calcular o valor da resistência térmica das camadas, utilizando para isso o documento disponibilizado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, denominado de “ITE 50” (Santos & Matias, 2006), no sentido de achar a condutibilidade térmica do material correspondente à camada i. Como exemplo, na seleção da  $\lambda_i$  para as camadas de tijolo furado, foi usado o valor de 0,34, considerando que o tijolo tem uma massa volúmica aparente seca inferior a  $1000 \text{ kg/m}^3$  (Tabela 15). Para a determinação das resistências térmicas foi utilizada a mesma fonte.



Tabela 15 - Seleção da condutibilidade térmica do tijolo furado (Fonte: Santos &amp; Matias, 2006)

MATERIAL CERÂMICO		
material cerâmico para tijolos, blocos, telhas e ladrilhos	≤ 1000	0,34
	1000 - 1200	0,41
	1200 - 1400	0,50
	1400 - 1600	0,60
	1600 - 1800	0,69
	1800 - 2000	0,77
	2000 - 2200	0,92
	2200 - 2400	1,04

No que toca aos vãos envidraçados, apenas foram selecionadas 3 soluções, com destaque para o material utilizado na caixilharia e para a utilização de vidro duplo (Tabela 16).

Tabela 16 - Medidas de melhoria para vãos envidraçados

Vãos Envidraçados			
Variante	Var19	Var20	Var21
Material de caixilharia	PVC	Alumínio	Madeira
Espessura vidro exterior (mm)	6	6	6
Espessura câmara de ar (mm)	10	14	14
Espessura vidro interior (mm)	4	6	6
Coeficiente de transmissão térmica do aro (W/m².°C)	2,30	5,90	1,20
Coeficiente de transmissão térmica da caixa de estore (W/m².°C)	[1,60;1,80]	< 1,20	-
Coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado (W/m².°C)	2,10	3,40	1,60
Custo de manutenção anual do vão envidraçado (€/ano)	4,05	4,98	16,62
Preço unitário do vão envidraçado (€/uni)	351,73	315,09	830,79

Todas as características e dados presentes na Tabela 16, com exceção do coeficiente de transmissão térmica da janela ( $U_w$ ) que foi determinado através da fórmula de cálculo apresentada na ISO 10077-1, foram estipulados com recurso ao gerador de preços do CYPE (CYPE Ingenieros, 2013).

A fórmula do coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado é dada pela equação (4.3).

$$U_w = \frac{A_f \cdot U_f + A_g \cdot U_g + l_g \cdot \psi_g}{A_f + A_g} \text{ (W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (4.3)$$

Em que:

$A_f$  - Área do caixilho ( $\text{m}^2$ );

$U_f$  - Coeficiente de transmissão térmica do caixilho ( $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ );

$A_g$  - Área do vidro ( $\text{m}^2$ );

$U_g$  - Coeficiente de transmissão térmica do vidro ( $\text{m}^2$ );

$l_g$  - Perímetro de ligação entre o caixilho e o vidro ( $m$ );

$\psi_g$  - Coeficiente de transmissão térmica linear relativo à ligação entre o caixilho e o vidro ( $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ).

Todos estes parâmetros, com exceção do  $\psi_g$ , podem ser encontrados no gerador de preços do CYPE.

O valor referente ao  $\psi_g$  pode definido através da Tabela 17, encontrada na ISO 10077-1. Este valor varia consoante o tipo de caixilharia e de vidro adotados.

*Tabela 17 - Valor do coeficiente de transmissão térmica linear relativo à ligação entre o caixilho e o vidro (Fonte: ISO, 2017b)*

Tipo de caixilharia	Valor do coeficiente de transmissão térmica linear para diferentes tipos de vidros, $\psi_g$ (W/m.°C)		
	Vidros duplos ou triplos não revestidos	Vidros duplos ou triplos de baixa emissividade	Vidros simples
Madeira ou PVC	0,06	0,08	0
Metálica sem corte térmico	0,08	0,11	
Metálica com corte térmico	0,02	0,05	

De seguida, foi criada uma combinação das medidas de melhoria da envolvente exterior, apresentadas na Tabela 13 e na Tabela 14, com a variante convencional de sistemas técnicos, presente na Tabela 9. Assim sendo, são produzidas 21 variantes no total, 18 medidas de melhoria das paredes exteriores e 3 medidas de melhoria dos vãos envidraçados.

A respeito dos sistemas técnicos, foram selecionados alguns equipamentos para as finalidades energéticas pretendidas, tal como já foi referido, e foram implementadas 4 variantes com algumas combinações dessas tecnologias, apostando numa maior diversidade de soluções de elevada eficiência e na integração de alguns sistemas de energia renovável (Tabela 18). Note-se que os conjuntos de sistemas técnicos selecionados são considerados sistemas descentralizados, ou seja, cada uma das frações é sustentada por um conjunto de sistemas técnicos individual.

Quanto aos sistemas de energia renovável, importa referir que a energia produzida a partir de coletores solares térmicos (ST) é determinada com o objetivo de apenas corresponder com o mínimo obrigatório definido na regulamentação nacional e utilizada para reduzir a produção de águas quentes sanitárias (AQS), enquanto que a energia produzida a partir de painéis fotovoltaicos (PV) é estabelecida com o objetivo de cobrir a totalidade das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento.

*Tabela 18 - Soluções de melhoria de sistemas técnicos*

Variante	Solução de Aquecimento	Solução de AQS	Solução de Arrefecimento	Sistemas de Energia Renovável
<b>S1</b>	Caldeira de condensação ( $\eta=92,70\%$ )	Caldeira de condensação ( $\eta=85,00\%$ )	Sistema Multisplit (EER=4,00)	-
<b>S2</b>	Caldeira de biomassa ( $\eta=90,00\%$ )	Caldeira de biomassa ( $\eta=90,00\%$ )	Sistema Multisplit (EER=4,00)	-
<b>S3</b>	Bomba de calor (COP=3,33)	Bomba de calor (COP=3,33)	Bomba de calor (EER=2,68)	-
<b>S4</b>	Sistema Multisplit (COP=4,10)	Caldeira elétrica (COP=1,50)	Sistema Multisplit (EER=3,50)	PV(Zero) + ST para AQS

#### 4.5 Rentabilidade

No sentido de determinar as necessidades nominais anuais globais de energia primária para as medidas de melhoria isoladas, tal como para a intervenção de referência, foi utilizada a metodologia definida no REH. Após as necessidades energéticas terem sido determinadas, segue-se a aplicação da metodologia de custo-ótimo. Os resultados provenientes desse processo de cálculo são apresentados nos gráficos da Figura 23 (perspetiva privada) e da Figura 24 (perspetiva social).

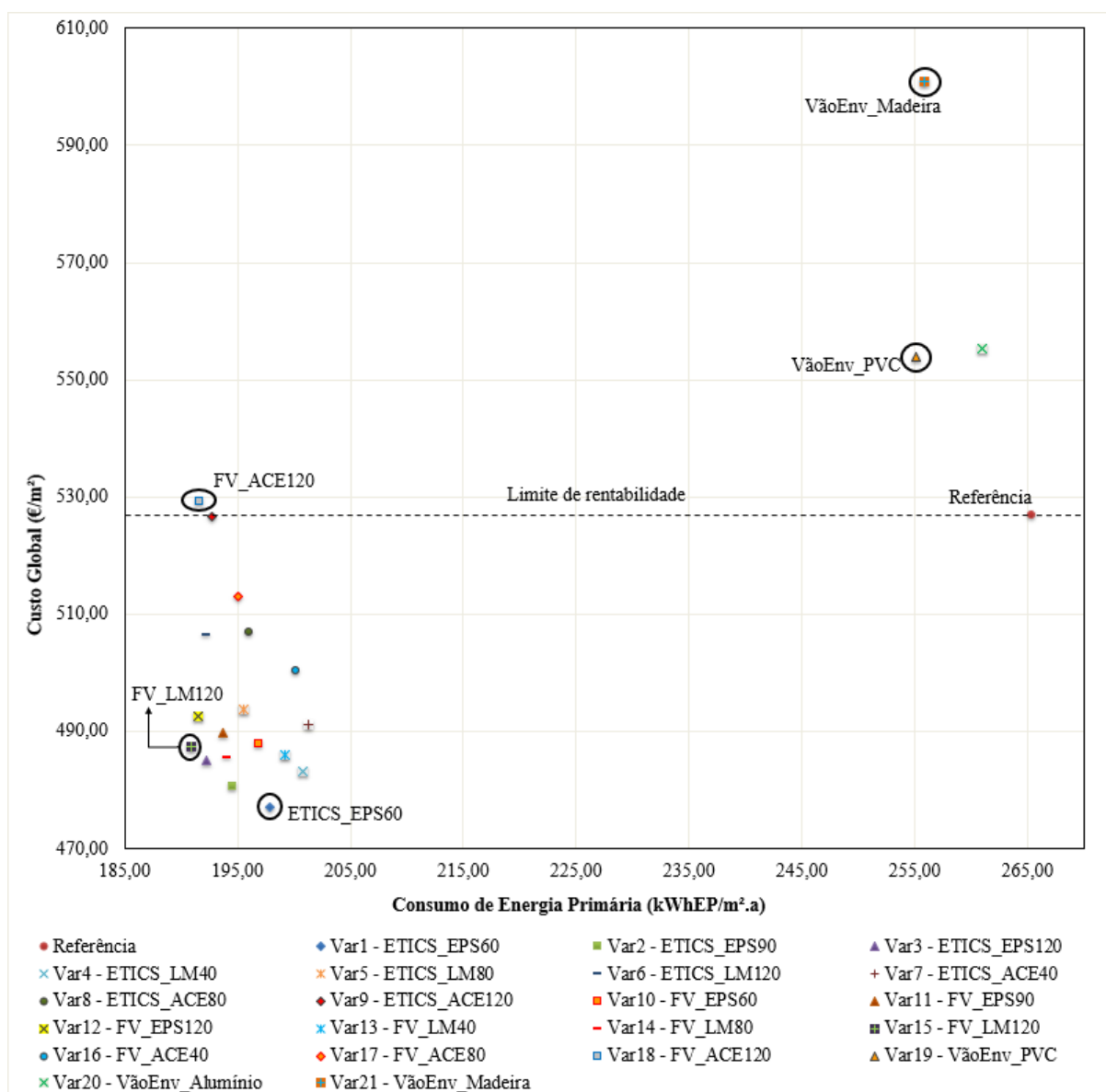


Figura 23 - Nível de rentabilidade das medidas de melhoria isoladas, numa perspetiva privada

Analisando o gráfico da Figura 23, constata-se que todas as variáveis representantes das medidas de melhoria dos vãos envidraçados (Var19, Var20 e Var21) não são consideradas rentáveis, assim como a variável 18 (fachada ventilada com cortiça de 120 mm). De entre todas as soluções de vãos envidraçados, a solução com caixilharia de PVC (Var19) é a que mais se destaca pela positiva, enquanto que a solução com caixilharia de madeira (Var21) salienta-se das restantes soluções por apresentar custos globais mais elevados.

A variável 15 (fachada ventilada com lã mineral de 120 mm) é a solução com melhor desempenho energético (190,86 kWh/m².a), apresentando uma redução de 28,09% do consumo de energia primária,

face à intervenção de referência. Por outro lado, a variável 1 (ETICS com EPS de 60 mm) é a solução com menores custos globais associados (477,00 €/m<sup>2</sup>), apresentando uma redução de 9,46% face à intervenção de referência, e por isso é considerada a solução de custo ótimo.

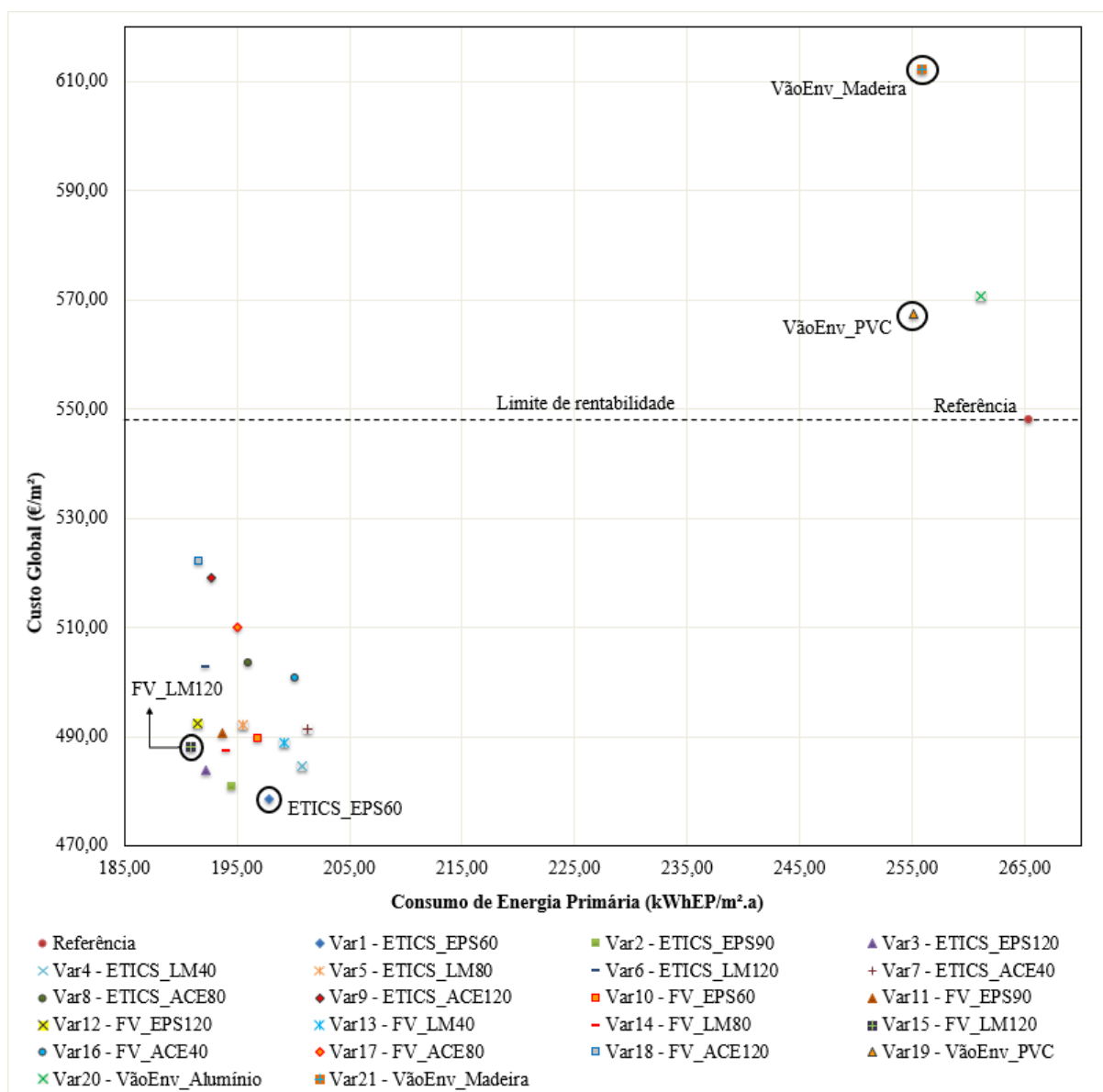


Figura 24 - Nível de rentabilidade das medidas de melhoria isoladas, numa perspetiva privada

Alterando o foco para o gráfico da Figura 24, é possível observar-se que, ao contrário do que aconteceu no gráfico da Figura 23, todas as soluções de melhoria de paredes exteriores são rentáveis, graças também a uma subida dos custos globais da intervenção de referência. Já quanto aos vãos envidraçados, todas as soluções se mantêm não rentáveis. De entre todas as soluções de vãos envidraçados, a solução

com caixilharia de PVC (Var19) continua a ser a que mais se destaca pela positiva, assim como a solução com caixilharia de madeira (Var21) continua a apresentar custos globais elevados.

A variável 15 (fachada ventilada com lã mineral de 120 mm) continua a ser a solução com melhor desempenho energético, em virtude da inalteração dos consumos de energia primária. A variável 1 (ETICS com EPS de 60 mm) volta a ser a solução de custo ótimo, apenas desta vez apresenta uma redução de 12,66% face à intervenção de referência.

Tendo analisado os gráficos determinantes do nível de rentabilidade das medidas de melhoria isoladas, segue-se a determinação das medidas de melhoria da envolvente exterior a integrar nos pacotes de reabilitação (Tabela 19).

Aquando da análise dos gráficos da Figura 23 e Figura 24 constatou-se que, quanto aos vãos envidraçados, a solução com caixilharia de PVC (Var19) é a que possui o melhor nível de rentabilidade, apesar de negativa. No que toca às soluções de paredes exteriores, identificaram-se as seguintes variáveis:

1. Variável 15 (fachada ventilada com lã mineral de 120 mm) como solução com melhor desempenho energético;
2. Variável 1 (ETICS com EPS de 60 mm) como solução de custo ótimo;
3. Variável 3 (ETICS com EPS de 120 mm) como solução com menores custos de exploração;
4. Variável 2 (ETICS com EPS de 90 mm) como solução corrente

*Tabela 19 - Soluções de melhoria da envolvente exterior (tipologia representativa)*

	<b>Solução com melhor desempenho energético  P1</b>	<b>Solução de custo ótimo  P2</b>	<b>Solução com menores custos de exploração  P3</b>	<b>Solução corrente  P4</b>
<i><b>Paredes exteriores</b></i>	FV_LM120mm	ETICS_EPS60mm	ETICS_EPS120mm	ETICS_EPS90mm
<i><b>Vãos envidraçados</b></i>	PVC	PVC	PVC	Alumínio

Para finalizar a formação dos pacotes de reabilitação, cada uma das soluções de envolvente exterior, identificadas na Tabela 19, foi combinada com todas as soluções de melhoria de sistemas técnicos presentes na Tabela 18.

De seguida, o cálculo das necessidades energéticas de cada um dos pacotes de reabilitação foi efetuado, tendo em conta a metodologia de cálculo definida pelo REH. Após as necessidades energética terem sido determinadas, segue-se a aplicação da metodologia de custo-ótimo. Os resultados provenientes desse processo de cálculo são apresentados nos gráficos da Figura 25 (perspetiva privada) e da Figura 26 (perspetiva social).



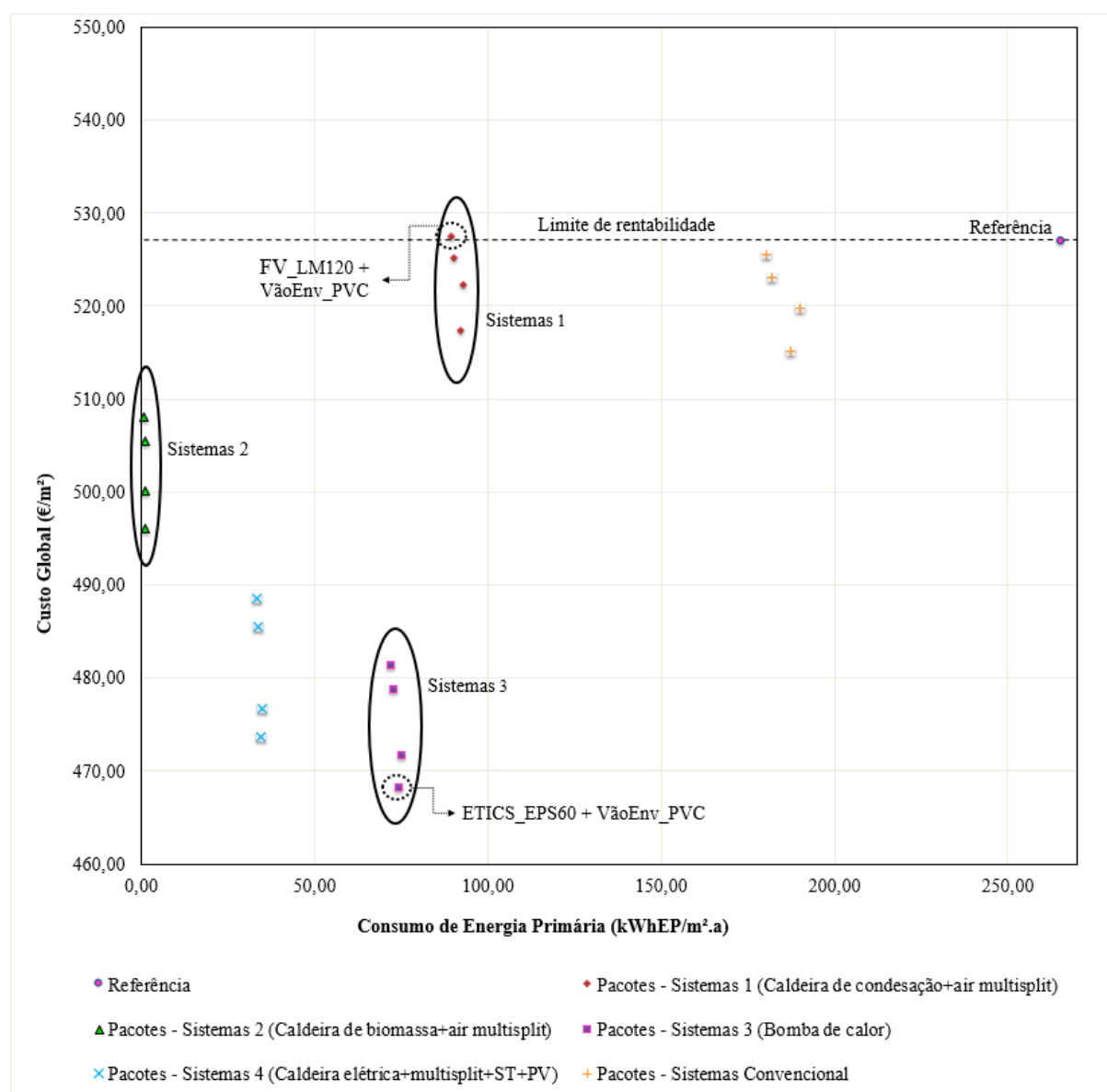


Figura 25 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação, numa perspectiva privada (tipologia representativa)

Analisando o gráfico correspondente à perspectiva privada, é possível averiguar-se que apenas o pacote que integra o P1 (fachada ventilada com lã mineral de 120 mm e vão envidraçado com caixilharia de PVC) e os S1 (caldeira de condensação + *multisplit*) não é considerado rentável (Figura 25).

Os pacotes que envolvem os S2 (caldeira de biomassa + *multisplit*) correspondem aos pacotes com melhor desempenho energético e ainda possuem valores próximos do *ZEB* (consumo de energia primária próximo de 0), graças à atribuição de fonte de energia não renovável à caldeira de biomassa.

Por fim, o pacote que integra o P2 (ETICS com EPS de 60 mm e vão envidraçado com caixilharia de PVC) e os S3 (bomba de calor) é considerado a solução de custo ótimo por ser o pacote com menos custos globais associados (468,22 €/m<sup>2</sup>), contando com uma redução de 11,14% dos custos globais, em comparação com a intervenção de referência. Adicionalmente, promove uma redução de 71,88% do consumo de energia primária, face à intervenção de referência.

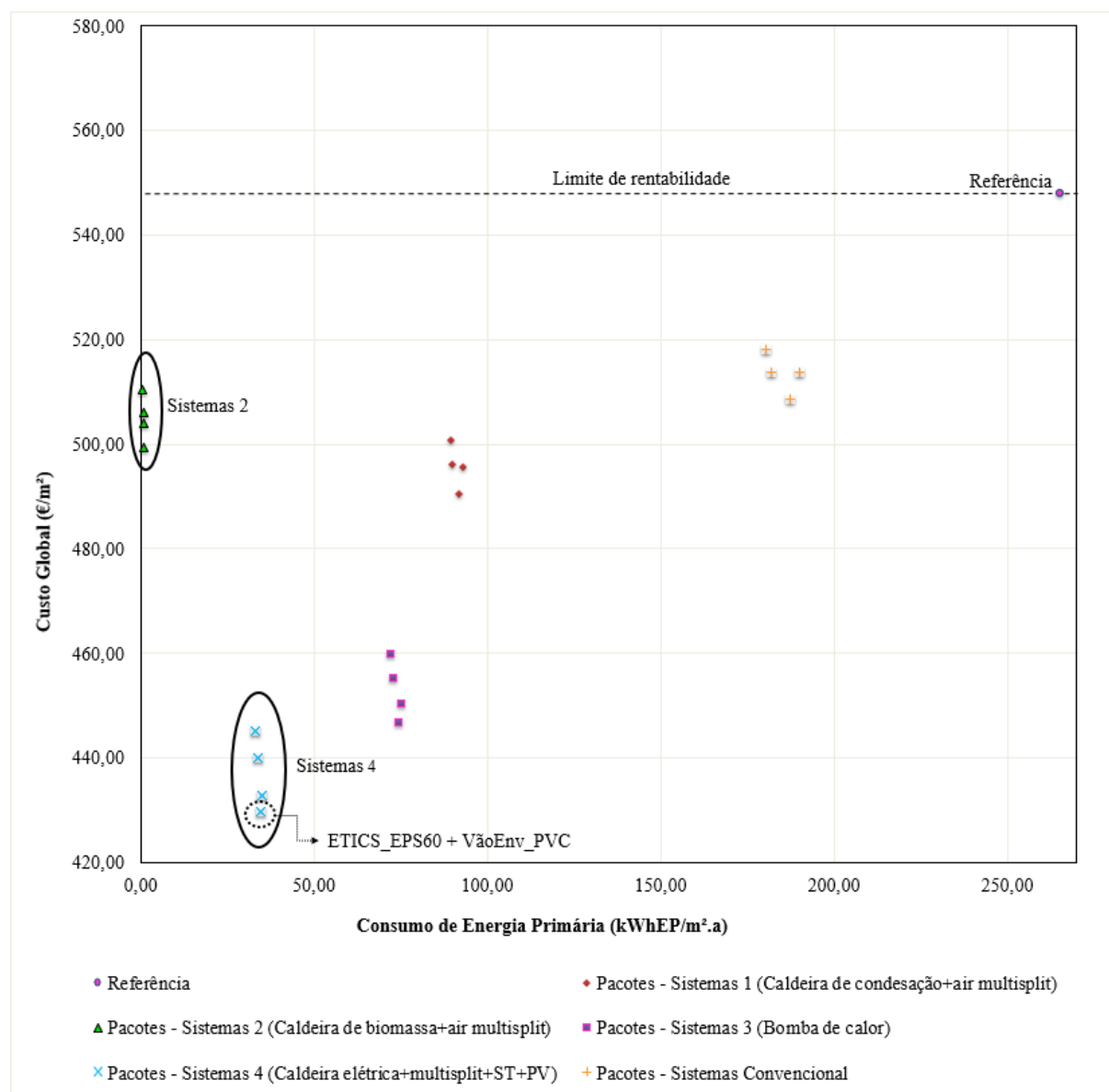


Figura 26 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação, numa perspetiva social (tipologia representativa)

Contrariamente ao gráfico representante da perspetiva privada, todos os pacotes de reabilitação são considerados rentáveis, em comparação com a variante de referência (Figura 26).

Os pacotes referentes aos S2 (caldeira de biomassa + *multisplit*) continuam a ser os pacotes com melhor desempenho energético e com valores de consumo de energia primária próximos do zero, isto porque o consumo de energia mantém-se inalterado aquando da alteração de perspetiva privada para social.

A solução de custo ótimo passa a ser o pacote que integra o P2 (ETICS com EPS de 60 mm e vão envidraçado com caixilharia de PVC) e os S4 (caldeira elétrica + *multisplit* + coletores solares + painéis fotovoltaicos). Este pacote contabiliza uns custos globais de 429,84 €/m<sup>2</sup>, o que representa uma diminuição de 21,56% relativamente à intervenção de referência.

#### 4.5.1 Extrapolação dos resultados para o grupo de edifícios

O último passo da metodologia compreende a extrapolação dos resultados, provenientes dos pacotes de reabilitação da tipologia tipo, para o grupo de edifícios.

Com a finalidade de determinar os níveis de rentabilidade de cada um dos pacotes de reabilitação do bairro social, é aplicada a metodologia de custo ótimo com uma linha de desenvolvimento igual à usada nos pacotes de reabilitação da tipologia representativa. Apenas são introduzidas as seguintes alterações:

1. Alteração de certos equipamentos/sistemas e eficiências de equipamentos;
2. Quantidades de equipamentos;
3. Aplicação de economias de escala nas soluções de fachada;

Para que a avaliação ao nível do grupo de edifícios seja robusta, é fundamental que os equipamentos definidos nas medidas de melhorias isoladas sejam trocados por equipamentos mais adequados em edifícios multifamiliares, nomeadamente:

1. A caldeira de condensação mural foi substituída pela caldeira de condensação de chão, com um acumulador de água;
2. O *multisplit* com conexão a 4 equipamentos interiores foi substituído por um *multisplit multi city* com conexão a 12 equipamentos interiores;
3. A caldeira de biomassa foi substituída por um equipamento semelhante, apenas mais potente e com integração de um depósito de 500 litros;
4. A bomba de calor foi substituída por uma bomba de calor reversível, composto por um monobloco de baixa temperatura e por um depósito de água de 500 litros.

Em consequência da substituição destes equipamentos, as eficiências dos mesmos também são alteradas. Na Tabela 20 são apresentados os equipamentos integrados e suas eficiências.

*Tabela 20 - Soluções de melhoria da envolvente exterior (grupo de edifícios)*

Sistemas Técnicos				
Variante	Solução de Aquecimento	Solução de AQS	Solução de Arrefecimento	Sistemas de Energia Renovável
1	Caldeira de condensação de chão ( $\eta=93,00\%$ )	Caldeira de condensação de chão ( $\eta=82,00\%$ )	Multisplit (EER=3,43)	-
2	Caldeira de biomassa ( $\eta=90,00\%$ )	Caldeira de biomassa ( $\eta=90,00\%$ )	Multisplit (EER=3,43)	-
3	Bomba de calor (COP=3,76)	Bomba de calor (COP=3,76)	Bomba de calor (EER=3,09)	-
4	Multisplit (COP=4,03)	Caldeira elétrica (COP=1,50)	Multisplit (EER=3,43)	PV (Zero) + ST para AQS

As alterações das eficiências dos equipamentos implicam que o cálculo das necessidades energéticas seja corrigido.

As quantidades de equipamentos também foram modificadas, visto que neste momento, não é realizada uma análise da tipologia representativa, mas sim uma análise do bairro social, constituído por 178 frações habitacionais (Tabela 21).

*Tabela 21 - Quantidade de sistemas técnicos*

Sistemas	Unidade de medida	Quantidade
Ar condicionado Multisplit City Multi; Instalação exterior; COP=4,03; EER=3,43	un	69,00
Ar condicionado Multisplit City Multi; Instalação interior; COP=4,12; EER=3,99	un	712,00
Ar-ar Multisplit; Instalação exterior; EER=2,80	un	178,00
Ar-ar Multisplit; Instalação interior; EER=2,80	un	890,00
Caldeira de condensação a gás de chão com acumulador de 500L; $\eta_s=93\%$ ; $\eta_{wh}=82\%$	un	40,00
Bomba de calor reversível com depósito de 500L; COP=3,76; EER=3,09	un	40,00
Caldeira elétrica de AQS; Cap=75L; COP=1,5	un	178,00
Aquecedor a gás; $\eta=75\%$	un	178,00
Aquecedor elétrico 100%	un	534,00
Radiadores	m <sup>2</sup>	13818,14
Convetores para bomba de calor	un	712,00
<b>Fontes de energia renovável</b>	<b>Unidade de medida</b>	<b>Quantidade</b>
Caldeira de biomassa + Depósito de 500L; $P_{nom}=44kW$ ; $\eta=90\%$	un	40,00
PV kit autoconsumo 1500kW	vg	76,00
Coletores solares térmicos; $\eta_{ótico}=73\%$	vg	712,00

Antes do esclarecimento das quantidades de equipamentos que foram calculadas, deve-se ter em conta que existem 178 frações habitacionais, 20 edifícios multifamiliares e que, 11 deles são constituídos por 8 frações habitacionais e 9 são constituídos por 10 frações habitacionais.

Segue-se então, a justificação da quantidade de cada um dos sistemas técnicos instalados:

1. O ar condicionado *Multisplit City Multi* é constituído por 69 unidades exteriores, 712 unidades interiores e 178 caixas de derivação;
  - 1.1. Unidades exteriores: são necessárias 4 para cada edifício com 10 frações e 3 para cada edifício com 8 frações;
  - 1.2. Unidades interiores: são necessárias 4 unidades para cada uma das frações;
  - 1.3. Caixas de derivação: é necessária 1 unidade para cada uma das frações;
2. O ar-ar *multisplit* incorpora 178 unidades exteriores e 890 unidades interiores, visto que são necessárias 5 unidades interiores e 1 unidade exterior por fração;
3. A caldeira de condensação a gás de chão com acumulador de 500 litros é constituída por 40 unidades, em consequência da necessidade de 2 unidades destas por cada edifício multifamiliar;
4. A bomba de calor reversível é constituída por 20 monoblocos de baixa temperatura e 20 depósitos de AQS, dado que são necessárias 2 unidades de monobloco e 2 unidades de depósito para cada edifício multifamiliar;
5. A caldeira elétrica e o aquecedor a gás são constituídos por 178 unidades cada uma, como efeito da necessidade de 1 unidade de cada por fração multifamiliar;
6. O aquecedor elétrico, com 534 unidades, é distribuído uniformemente, sendo necessário 3 unidades por fração (1 unidade por quarto);
7. Os radiadores, integrado com a caldeira de condensação a gás e caldeira de biomassa, são distribuídos ao longo da área útil de pavimento, que neste caso é de 13218,14 m<sup>2</sup>;
8. Os convetores, destinados a apoiar as bombas de calor, são compostos por 712 unidades. Isto porque são instaladas 4 unidades por fração;
9. A caldeira de biomassa com depósito de AQS de 500 litros é constituída por 40 unidades, fruto da necessidade de 2 unidades destas por cada edifício multifamiliar;
10. Os painéis fotovoltaicos são constituídos por 76 kits dos mesmos, em virtude dos cálculos efetuados no *software* PVGIS;
11. Os coletores solares térmicos, com 712 unidades, requerem a instalação de 4 unidades por fração. A quantidade de coletores foi determinada através do *software* SCE.ER.

Aquando da seleção dos novos sistemas técnicos centralizados, foi analisado o espaço disponível para instalar os equipamentos, considerando que, no caso da caldeira de condensação a gás, da bomba de calor e da caldeira de biomassa, 2 unidades de cada um destes sistemas assistem entre 4 a 5 frações habitacionais, consoante o edifício seja constituído por 8 ou 10 frações habitacionais. Quanto à seleção dos painéis fotovoltaicos e dos coletores solares térmicos, foi considerado de que não haveria limitação de espaço disponível.

De seguida, as economias de escala são impostas por intermédio de aplicação de uma taxa de desconto no custo de investimento inicial de cada uma das soluções de fachada, em virtude da compra de 7195 m<sup>2</sup> de solução de parede exterior e de 1234 m<sup>2</sup> de solução de vão envidraçado. A taxa de desconto imposta no custo de investimento inicial das soluções de fachada foi de 14%, por ter sido a taxa de desconto utilizada no estudo protagonizado por Thuesen (2010).

Definidas as alterações a realizar, segue-se a correção do valor das necessidades nominais anuais globais de energia primária, em virtude da alteração da eficiência de certos equipamentos. De seguida, a metodologia de custo-ótimo é aplicada. Os resultados provenientes deste processo de cálculo são apresentados nos gráficos da Figura 27 (perspetiva privada) e da Figura 28 (perspetiva social).

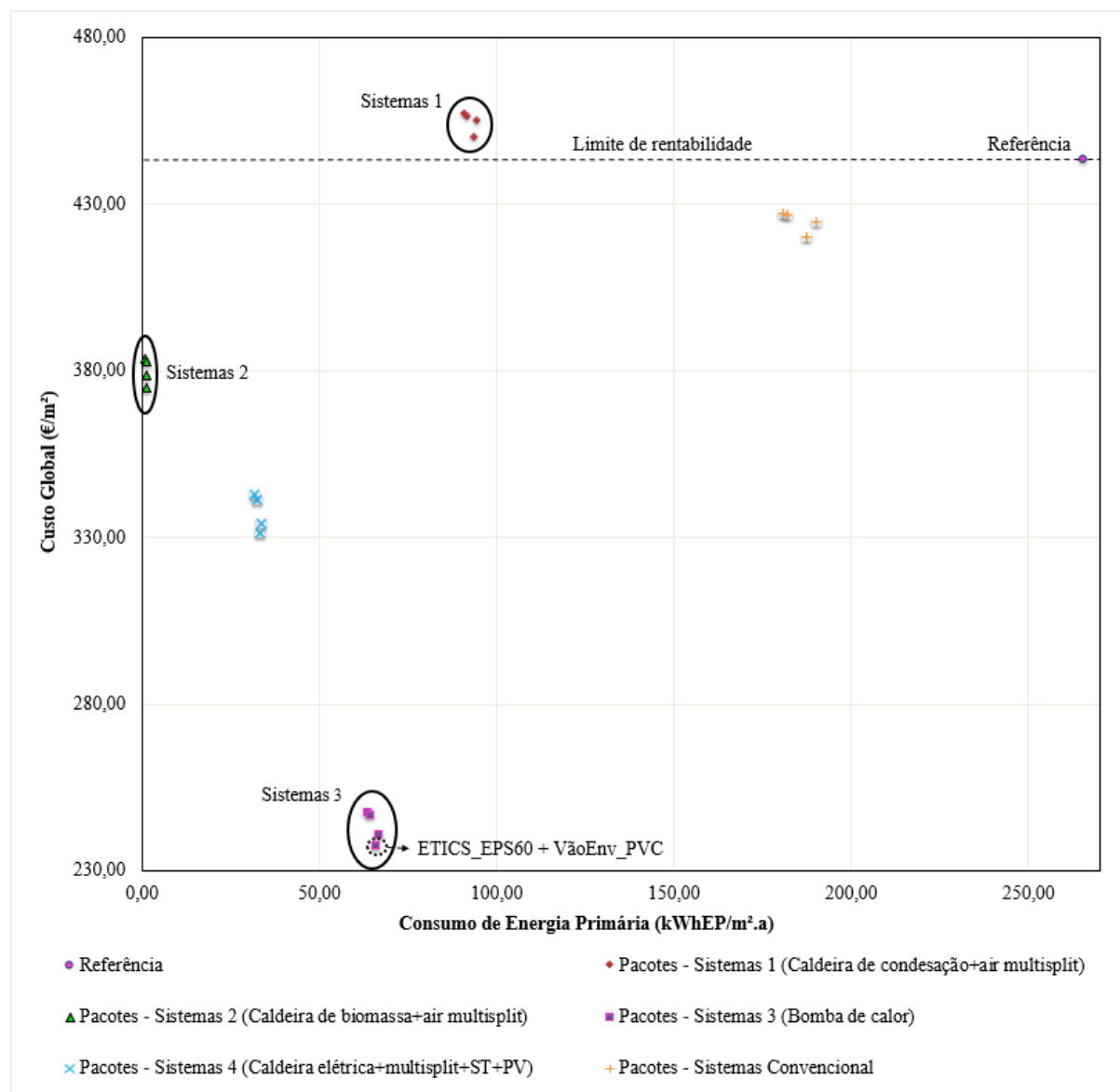


Figura 27 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação, numa perspetiva privada (grupo de edifícios)

Iniciando a análise dos resultados do bairro social com a perspetiva privada, observa-se que todos os pacotes de reabilitação, exceto os dos S1 (caldeira de condensação + *multisplit*), são considerados rentáveis, em comparação com a intervenção de referência (Figura 27).

Os pacotes que envolvem os S2 (caldeira de biomassa + *multisplit*) são os únicos pacotes com um consumo de energia primária próximo do consumo nulo, ou seja, indicam valores próximos do ZEB, embora que os custos globais associados sejam elevados (entre os 374,72 €/m<sup>2</sup> e os 383,53 €/m<sup>2</sup>).



Os pacotes que adotam os S3 (bomba de calor) são os pacotes com custos globais mais reduzidos, inclusive apresentam uma margem considerável em relação aos restantes pacotes. De entre estes pacotes, o pacote que integra o P2 (ETICS com EPS de 60 mm e vão envidraçado com caixilharia de PVC) é considerado a solução de custo ótimo, uma vez que apresenta o valor mais reduzido de custos globais totais (237,37 €/m<sup>2</sup>), contando com uma redução de 46,44% dos custos globais, em comparação com a intervenção de referência. Adicionalmente, promove uma redução de 75,11% do consumo de energia primária, face à intervenção de referência.

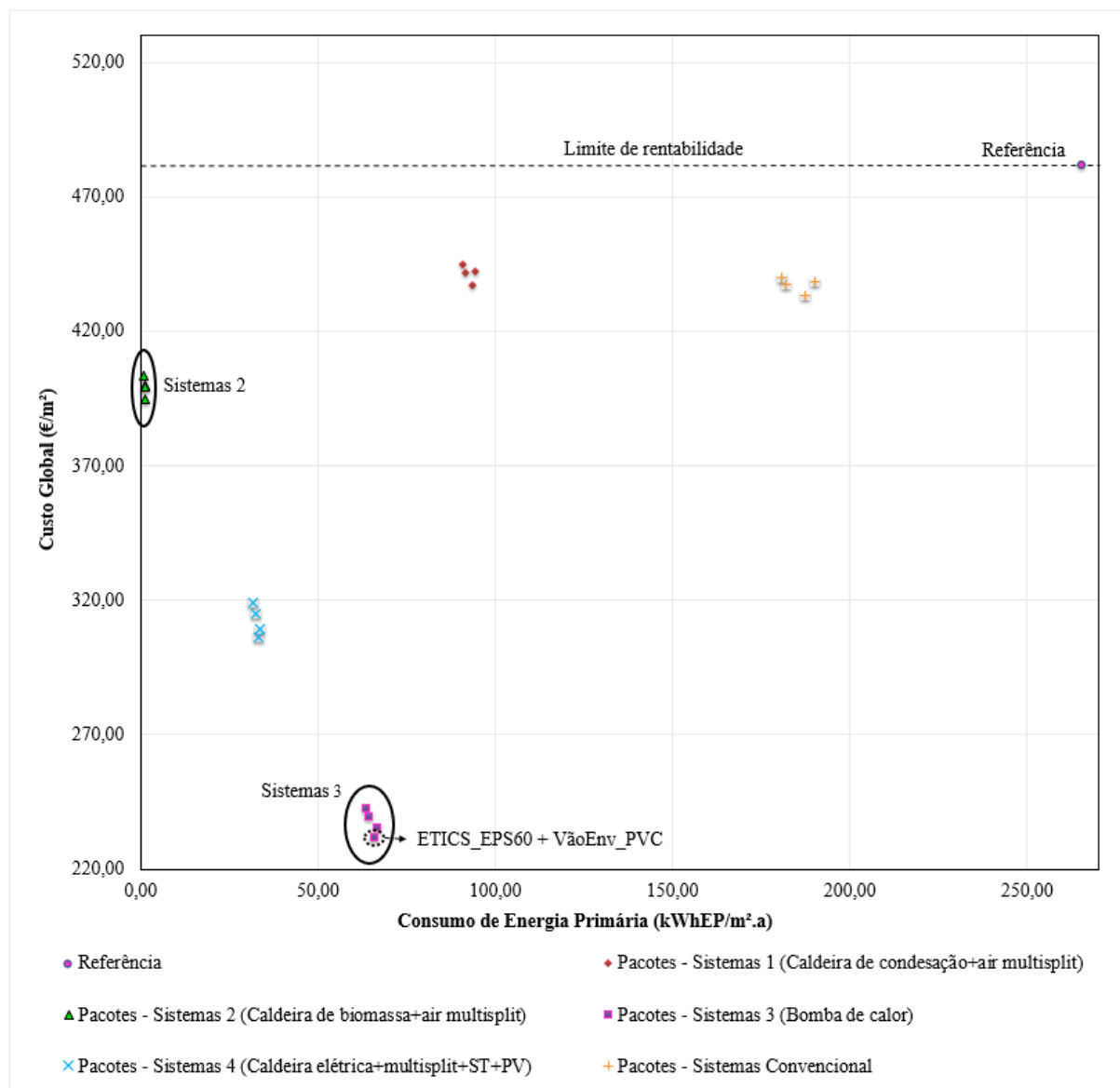


Figura 28 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação, numa perspetiva social (grupo de edifícios)

Ao contrário do que acontece na perspectiva privada, todos os pacotes de reabilitação da perspectiva social são considerados rentáveis (Figura 28).

Tal como na perspectiva privada, os pacotes que incluem a integração dos S2 (caldeira de biomassa + *multisplit*) representam as soluções com melhor desempenho energético, inclusive valores próximos do ZEB (consumo de energia primária próximo do consumo nulo), mesmo que os custos globais associados sejam elevados (entre os 394,71 €/m<sup>2</sup> e os 403,27 €/m<sup>2</sup>).

Os pacotes que envolvem os S3 (bomba de calor) são, novamente, os pacotes com menores custos globais associados, por uma margem elevada. O pacote que incorpora o P2 (ETICS com EPS de 60 mm e vão envidraçado com caixilharia de PVC) continua a ser considerado como a solução de custo ótimo, apenas com uma ligeira descida dos custos globais para 231,82 €/m<sup>2</sup> e, portanto, contando com uma redução de 51,90% dos custos globais, em comparação com a intervenção de referência.

Tendo analisado os gráficos relativos ao nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação, interessa agora comparar os resultados obtidos ao nível da tipologia representativa e do bairro social e posteriormente, identificar as vantagens que a transição para grupo de edifícios pode motivar (Figura 29 e Figura 30).

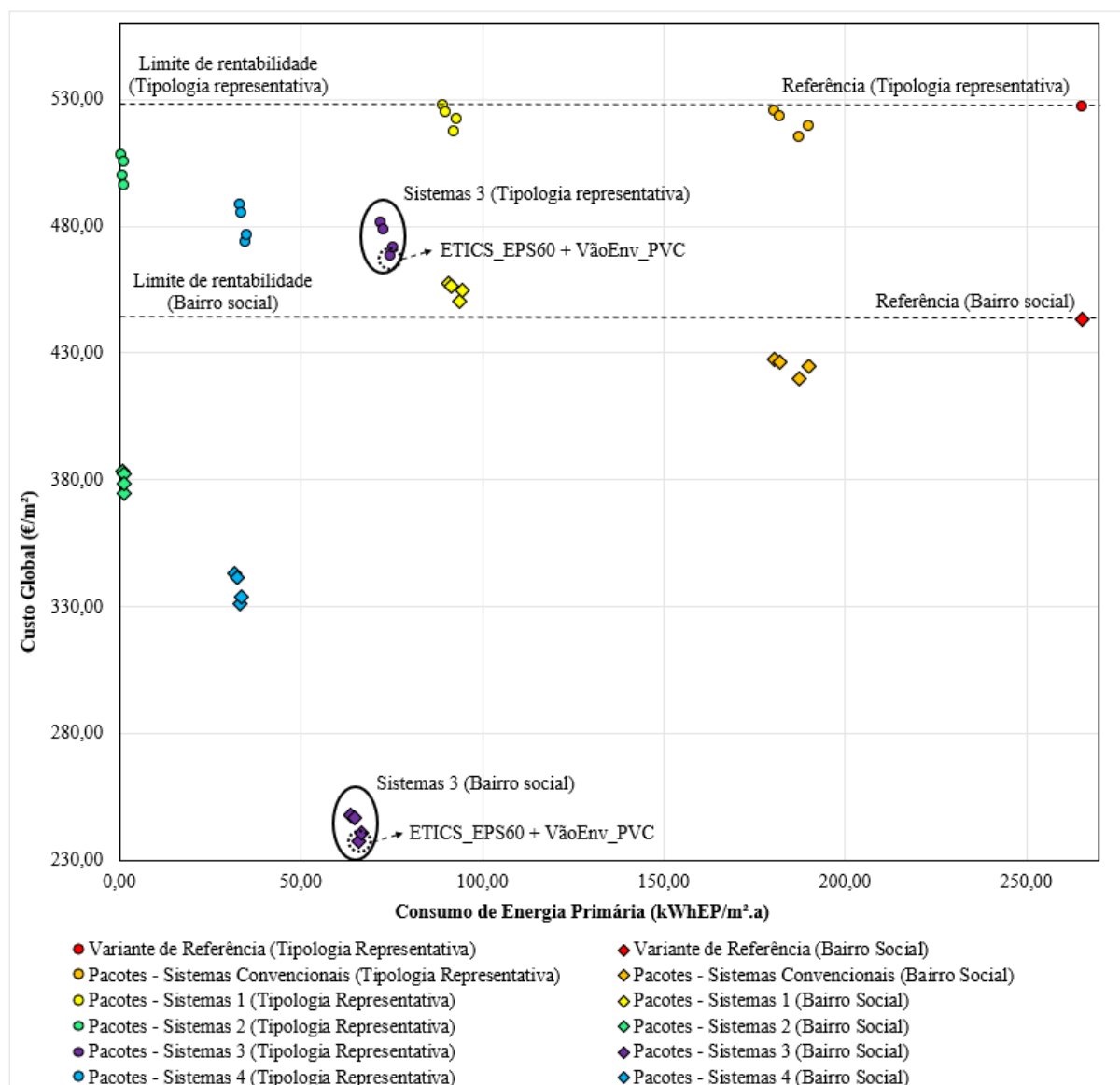


Figura 29 - Nível de rentabilidade numa perspectiva privada (Tipologia representativa e grupo de edifícios)

Na Figura 29 estão representados todos os pacotes de reabilitação da tipologia representativa e do bairro social, numa perspectiva privada. No caso da tipologia representativa, a solução de custo ótimo corresponde ao pacote que inclui o P2 (ETICS com EPS de 60mm e vão envidraçado com caixilharia de PVC) e os S3 (bomba de calor) apresenta custos globais no valor de 468,22 €/m<sup>2</sup>, enquanto que, para o bairro social a solução de custo ótimo (P2+S3) apresenta uns custos globais no valor de 237,37 €/m<sup>2</sup>. Assim sendo, conclui-se que por se concretizar a intervenção de reabilitação em todo o bairro social, ao invés de apenas numa fração, são geradas reduções no valor dos custos globais de 230,85 €/m<sup>2</sup>, ou seja, uma redução de cerca de 50%. Tais reduções nos custos globais totais devem-se à alteração de

sistemas técnicos e consequente diminuição nas quantidades dos mesmos, e ainda às economias de escala providenciadas pela compra de elevada quantidade soluções de paredes exteriores e de vãos envidraçados.

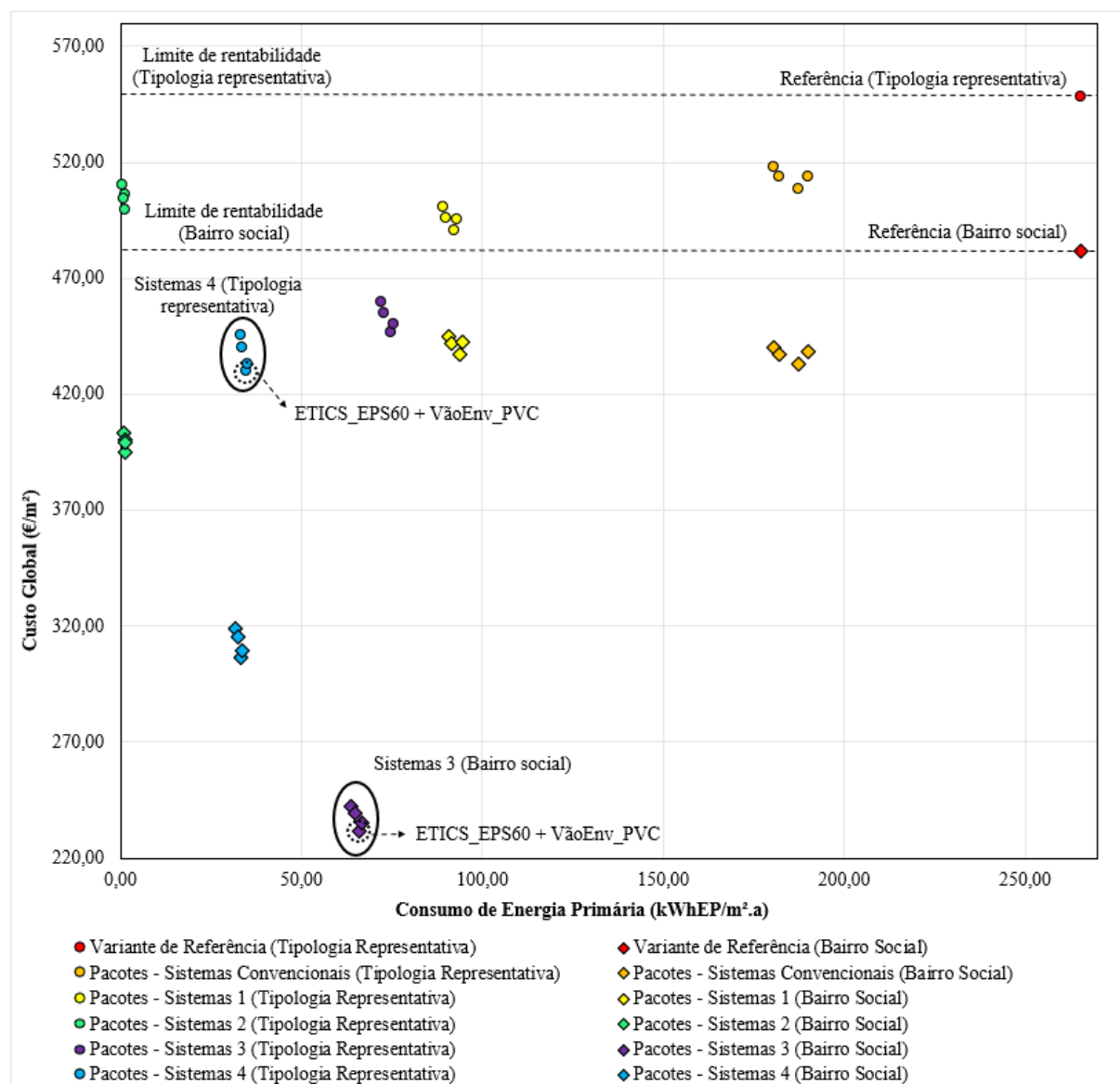


Figura 30 - Nível de rentabilidade numa perspetiva social (Tipologia representativa e grupo de edifícios)

Na Figura 30 são apresentados todos os pacotes de reabilitação da tipologia representativa e do bairro social, numa perspetiva social. Relativamente à tipologia representativa, a solução de custo ótimo corresponde ao pacote que inclui o P2 (ETICS com EPS de 60mm e vão envidraçado com caixilharia de PVC) e os S4 (caldeira elétrica + *multisplit* + coletores solares + painéis fotovoltaicos) apresenta custos globais totais no valor de 429,84 €/m<sup>2</sup>, todavia para o bairro social a solução de custo ótimo (P2+S3)

apresenta uns custos globais totais no valor de 231,82 €/m<sup>2</sup>. Por conseguinte, entende-se que por se concretizar a intervenção de reabilitação em todo o bairro social, ao invés de apenas numa fração, são geradas reduções no valor dos custos globais de 198.02 €/m<sup>2</sup>, ou seja, uma redução de 46,07%. Tal como na perspectiva privada, as reduções consideráveis nos custos globais totais devem-se à alteração de sistemas técnicos e consequente diminuição nas quantidades dos mesmos, e ainda às economias de escala providenciadas pela compra de elevada quantidade soluções de paredes exteriores e de vãos envidraçados.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1 Conclusão

Com a finalidade de contribuir para um melhor entendimento das sinergias conseguidas pela reabilitação de um grupo de edifícios, definiu-se uma metodologia capaz de avaliar, energeticamente e financeiramente, um conjunto de edifícios habitacionais e de determinar o cenário de reabilitação com melhor nível de rentabilidade. Nesta metodologia foi adotada uma tipologia representativa, com o propósito de permitir a extrapolação dos resultados para a escala de grupos de edifícios, através da atribuição da tipologia representativa e das suas características a todas as frações constituintes do bairro social. Foram realizadas adaptações também ao nível das avaliações do desempenho energético e da determinação dos custos globais, com a utilização da metodologia definida pelo Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e da metodologia de custo ótimo, respetivamente.

O Bairro Social de Santa Tecla em Braga foi escolhido para ser o caso de estudo deste projeto, dado que é um dos muitos casos em Portugal, em que a necessidade de reabilitação é algo elevada, em virtude do desempenho energético reduzido e do elevado nível de degradação.

As medidas de melhoria isoladas são constituídas por soluções de melhoria da envolvente exterior e pelos sistemas técnicos convencionais. Algumas das medidas de melhoria foram selecionadas para serem combinadas com sistemas técnicos mais eficientes, incluindo fontes de energia renovável, como é o caso da caldeira de biomassa, os painéis fotovoltaicos e os coletores solares térmicos. Estas agregações de medidas de melhoria da envolvente exterior com os sistemas técnicos, resultaram na formação de 20 pacotes que configuram cenários de reabilitação numa perspetiva integrada de medidas.

A constituição de pacotes de reabilitação são a melhor forma de determinar qual a solução de reabilitação que conduz a um nível de necessidades energéticas quase nulas, e por isso, numa fase inicial foram avaliados para a tipologia representativa, em termos de desempenho energético e de custos, numa perspetiva privada e social. Os resultados obtidos para a perspetiva privada, demonstram que o pacote

que inclui o P2 (ETICS com EPS de 60mm e vão envidraçado com caixilharia de PVC) e os S3 (bomba de calor) é o cenário de custo ótimo, dado que é o pacote de reabilitação com menores custos globais associados (468,22 €/m<sup>2</sup>), apresentando uma redução de 72% do consumo de energia primária, face à intervenção de referência. Em contrapartida, os resultados obtidos para a perspetiva social, indicam o pacote que incorpora o P2 (ETICS com EPS de 60mm e vão envidraçado com caixilharia de PVC) e os S4 (caldeira elétrica + *multisplit* + coletores solares + painéis fotovoltaicos) como o cenário de custo ótimo, já que é o pacote de reabilitação com menores custos globais associados (429,84 €/m<sup>2</sup>). Para além disso, apresenta uma redução de 87,00% do consumo de energia primária, face à intervenção de referência.

A extrapolação dos resultados obtidos da tipologia representativa para o bairro social requer que alguns dos sistemas técnicos sejam substituídos por sistemas mais apropriados a edifícios multifamiliares, que consequentemente, também provocam a alteração da quantidade de equipamentos a instalar, as suas eficiências e os seus preços de investimento e manutenção. Para além da modificação dos sistemas técnicos, também foi levada em consideração as economias de escala conseguidas pela compra em elevadas quantidades de materiais que fazem parte das soluções de melhoria da envolvente exterior, e por isso, em todas estas soluções de envolvente exterior foi aplicada uma taxa de desconto de 14% no custo de investimento inicial.

Da mesma forma que os pacotes de reabilitação foram avaliados para a tipologia representativa, também o foram para o bairro social inteiro. Os resultados obtidos, tanto para a perspetiva privada como social, demonstram que o pacote que inclui o P2 (ETICS com EPS de 60mm e vão envidraçado com caixilharia de PVC) e os S3 (bomba de calor) é o cenário de custo ótimo, já que é o pacote de reabilitação com menores custos globais (237,37 €/m<sup>2</sup> na perspetiva privada e 231,82 €/m<sup>2</sup> na perspetiva social). Ademais, conduz a uma redução de 75,11% do consumo de energia primária, face à intervenção de referência.

Em suma, a realização de uma intervenção de reabilitação de um grupo de edifícios, em comparação com a de uma fração, incita a uma atenuação de 49,30% dos custos globais, numa perspetiva privada, e de 46,07% numa perspetiva social. Inclusive, constatou-se que, na generalidade, a solução de reabilitação que integra a bomba de calor (sistemas 3) revela ser o cenário de reabilitação com melhor nível de rentabilidade.

## 5.2 Trabalhos futuros

O desenvolvimento de uma metodologia que permita analisar o nível de rentabilidade de um grupo de edifícios é um tema pouco explorado e estudado, e por isso, apresenta uma grande margem de progresso. Nesse sentido, são propostas algumas sugestões para trabalhos futuros:

1. Integrar outros tipos de categorias de edifícios no estudo, para além dos edifícios residenciais;
2. Incorporar uma maior variedade de medidas de melhoria, incluindo a existência de um maior número de pacotes de reabilitação cujos sistemas técnicos se baseiam na produção de energia renovável;
3. Aplicar a metodologia desenvolvida em diversos casos de estudo;
4. Integrar uma análise de sensibilidade;
5. Expandir a escala de análise estatística de dados, para o nível de cidade ou distrito.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENE. (2016a). Ar Condicionado Doméstico. *10 Soluções Eficiência Energética*, 22–27. Retrieved from <https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2017/11/10see-09-ar-condicionado-1.pdf>
- ADENE. (2016b). Esquentadores e Caldeiras. *10 Soluções de Eficiência Energética*, 8 NV-10. Retrieved from <http://files/1201/10see-08-esq-caldeiras.pdf>
- ADENE. (2016c). Proteções Solares. *10 Soluções - Eficiência Energética*. Retrieved from <https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2017/11/10see-04-prot-solares-1.pdf>
- ADENE. (2016d). Sistemas de Ventilação. *10 Soluções - Eficiência Energética*. <https://doi.org/10.1177/1745691612469033>
- ADENE, APA, & EPAL. (2018). Ficha 6.b - Intervenções na envolvente envidraçada do edifício. *Casa Eficiente 2020 / Catálogo de Soluções Técnicas*. Retrieved from <https://casaeficiente2020.pt/media/1203/6b.pdf>
- ADENE, LNEC, INETI, & IPQ. (2004). *Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais. Publicação Gratuita*. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(08\)61125-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(08)61125-3)
- Albatici, R., Gadotti, A., Baldessari, C., & Chiogna, M. (2016). A decision making tool for a comprehensive evaluation of building retrofitting actions at the regional scale. *Sustainability (Switzerland)*, 8(10). <https://doi.org/10.3390/su8100990>
- Allface. (2008). Allface. Retrieved from <http://www.allface.at/pdfs/Allface Technic Folder ENG.pdf>.
- Almeida, M., & Barbosa, R. (2018). *O potencial das intervenções de renovação a nível urbano para edifícios nZEB - IEA EBC Annex 75*. Retrieved from <http://annex75.iea-ebc.org/Data/publications/EE116-reabilitacaoUM.pdf>
- Almeida, M., & Ferreira, M. (2017). Cost effective energy and carbon emissions optimization in building renovation (Annex 56). *Energy & Buildings*, 152, 718–738. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.050>

- Almeida, M., Ferreira, M., & Rodrigues, A. (2013). Reabilitação Energética do Parque Residencial. *Revista de Materiais de Construção*. Retrieved from [http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/29086/1/Revista Materiais de Construção\\_2013.pdf](http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/29086/1/Revista_Materiais_de_Construcao_2013.pdf)
- Almeida, M., Ferreira, M., & Rodrigues, A. (2014). Reabilitação energética do património construído: metodologia para determinação de soluções de custo ótimo. In Editora da Universidade Federal de Juiz de Fora (Ed.), *Ambiente Construído e sua Sustentabilidade*. Minas Gerais.
- Almeida, M., Ferreira, M., & Rodrigues, A. (2016). Definição de nZEB em Portugal – Contributo com base em análises de custo de ciclo de vida, 103–114.
- Aluminios Souto. (2011). Estores Interiores. Retrieved December 17, 2018, from <http://aluminiossouto.com/estores/estores-interiores>
- APA. (2009). *Qualidade do Ar em Espaços Interiores - Um Guia Técnico*. Amadora. Retrieved from [https://www.apambiente.pt/\\_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Guias e Manuais/manual QArInt\\_standard.pdf](https://www.apambiente.pt/_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Guias_e_Manuais/manual_QArInt_standard.pdf)
- APFAC. (2015). *ETICS - External Thermal Insulation Composite System*. Retrieved from <http://www.apfac.pt/uploads/documentos/apfac-manual-de-aplicacao-etics-2015-lq.pdf>
- Atanasiu, B., Despret, C., Economidou, M., Maio, J., Nolte, I., & Rapf, O. (2011). *Europe's Buildings under the Microscope: A country-by-country review of the energy performance of buildings*. Retrieved from [http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR\\_EU\\_B\\_under\\_microscope\\_study.pdf](http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf)
- Belpoliti, V., Bizzarri, G., Boarin, P., Calzolari, M., & Davoli, P. (2018). A parametric method to assess the energy performance of historical urban settlements. Evaluation of the current energy performance and simulation of retrofit strategies for an Italian case study. *Journal of Cultural Heritage*, 30, 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.08.009>
- Belussi, L., Danza, L., Ghellere, M., Guazzi, G., Meroni, I., & Salamone, F. (2017). Estimation of building energy performance for local energy policy at urban scale. *Energy Procedia*, 122, 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.379>
- BibLus. (2018). Proteções solares para edifícios e Brise-soleil: o que são e como desenhá-las com um software BIM. Retrieved December 17, 2018, from <http://biblus.accasoftware.com/ptb/protecoes-solares-para-edificios-e-brise-soleil-o-que-sao-e-como-desenha-las-com-um-software-bim/cosa-sono->

e-come-progettare-i-frangisole/

Brundtland, G. H. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development - "Our Common Future"*. Retrieved from [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/UN\\_WCED\\_1987\\_Brundtland\\_Report.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/UN_WCED_1987_Brundtland_Report.pdf)

Campos, K. F. (2011). *Desenvolvimento de Sistema de Fixação de Fachada Ventilada com Porcelanato de Fina Espessura*. Universidade Federal de Santa Catarina. <https://doi.org/10.1080/01402390.2011.569130>

Cao, X., Dai, X., & Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, 128, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>

Caputo, P., Costa, G., & Ferrari, S. (2013). A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Energy Policy*, 55, 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.006>

Cardoso, F. (2011). Edifícios são ponto-chave na nova estratégia europeia. *Edifícios e Energia*.

Comissão Europeia. (2006). A doce energia dos vulcões! Retrieved December 18, 2018, from [https://ec.europa.eu/regional\\_policy/pt/projects/portugal/the-soft-energy-of-volcanoes](https://ec.europa.eu/regional_policy/pt/projects/portugal/the-soft-energy-of-volcanoes)

Comissão Europeia. (2012). Regulamento Delegado (UE) N.º 244/2012 da Comissão de 16 de janeiro de 2012 que complementa a Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios, através do estabelecimento de um quadro metodológico. *Jornal Oficial Da União Europeia*, 18–36.

Corrado, V., Ballarini, I., & Paduos, S. (2014). Assessment of cost-optimal energy performance requirements for the Italian residential building stock. *Energy Procedia*, 45, 443–452. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.048>

CYPE Ingenieros, S. A. (2013). Gerador de preços para construção civil. Retrieved from <http://www.geradordeprecos.info/>

Daikin. (2018a). *Product catalogue 2018 - Heating*. Retrieved from [https://www.daikin.pt/content/dam/document-library/catalogues/heat/Heating\\_Installer\\_Product\\_catalogue\\_ECPEN18-721A\\_INTERACTIVE.pdf](https://www.daikin.pt/content/dam/document-library/catalogues/heat/Heating_Installer_Product_catalogue_ECPEN18-721A_INTERACTIVE.pdf)

- Daikin. (2018b). Tecnologia de bomba de calor de água quente sanitária | Daikin. Retrieved December 17, 2018, from [https://www.daikin.pt/pt\\_pt/product-group/domestic-hot-water-heat-pump.html](https://www.daikin.pt/pt_pt/product-group/domestic-hot-water-heat-pump.html)
- Dalla Mora, T., Peron, F., Romagnoni, P., Almeida, M., & Ferreira, M. (2018). Tools and procedures to support decision making for cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation. *Energy & Buildings*, 167, 200–215. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.030>
- Dascalaki, E. G., Droutsas, K. G., Balaras, C. A., & Kontoyiannidis, S. (2011). Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings - A case study for the Hellenic building stock. *Energy and Buildings*, 43(12), 3400–3409. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.002>
- Deco Proteste. (2014). Caldeiras murais a gás: faça bem as contas. Retrieved December 9, 2018, from <https://www.deco.proteste.pt/casa-energia/aquecimento/dicas/caldeiras-murais-a-gas-faca-bem-as-contas>
- Deco Proteste. (2018). Manutenção do sistema solar térmico evita reparações caras. Retrieved December 17, 2018, from <https://www.deco.proteste.pt/casa-energia/agua/noticias/manutencao-do-sistema-solar-termico-evita-reparacoes-caras>
- Direção-Geral de Energia e Geologia. (2017). *Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética*.
- Direção-Geral de Energia e Geologia. (2018). Software SCE.ER - aproveitamento de Fontes de Energia Renovável em edifícios. Retrieved from <http://www.dgeg.gov.pt/?cr=15161>
- EnerBuilding. (2008). *Eficiência energética nos edifícios residenciais*. Retrieved from [https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/enerbuilding\\_portuguese\\_guide\\_edificios\\_residenciais\\_pt.pdf](https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/enerbuilding_portuguese_guide_edificios_residenciais_pt.pdf)
- Energia Solar. (2015). Alta temperatura energia solar térmica. Retrieved December 17, 2018, from <https://pt.solar-energia.net/solar-termica/temperatura-alta>
- Engenharia Civil Online. (2011). Barragem do Alto - Lindoso. Retrieved December 18, 2018, from <http://engenhariacivilonline.blogspot.com/2011/05/barragem-do-alto-lindoso.html>
- Erbach, G. (2015). *Understanding energy efficiency*. Retrieved from [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568361/EPRS\\_BRI\(2015\)568361\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568361/EPRS_BRI(2015)568361_EN.pdf)
- European Commission. (2012). Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps. Retrieved

from <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>

European Commission. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings (2002). Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0091&from=EN>

European Commission. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>

European Commission. (2011). A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0112&from=EN>

European Commission. (2012a). Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating. *Official Journal of the European Union*, 18–36. [https://doi.org/10.3000/1977091X.C\\_2012.115.eng](https://doi.org/10.3000/1977091X.C_2012.115.eng)

European Commission. (2012b). Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council. *Official Journal of the European Union*, 55, 1–28. [https://doi.org/10.3000/19770677.L\\_2012.081.eng](https://doi.org/10.3000/19770677.L_2012.081.eng)

European Commission. (2013). *Guidance for National Energy Efficiency Action Plans*. Brussels. Retrieved from [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20131106\\_swd\\_guidance\\_neeaps.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20131106_swd_guidance_neeaps.pdf)

European Commission. (2018). Directive (EU) 2018/844. *Official Journal of the European Union*, 2018(May 2010), 75–91. [https://doi.org/10.1007/3-540-47891-4\\_10](https://doi.org/10.1007/3-540-47891-4_10)

Executive Agency for SMEs. (2017). *Building Renovation Challenge*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809239-2.00002-4>

Fracastoro, G. V., & Serraino, M. (2011). A methodology for assessing the energy performance of large scale building stocks and possible applications. *Energy and Buildings*, 43(4), 844–852. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.004>

- Gonçalves, H., & Graça, J. M. (2004). *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal*. <https://doi.org/10.1590/S0034-71672006000500016>
- Gouveia, J. P., Palma, P., Seixas, J., & Simões, S. (2017). Mapping Residential Thermal Comfort Gap at Very High Resolution Spatial Scale: Implications for Energy Policy Design. *IAEE Energy Forum*, 26(1), 43–45. <https://doi.org/10.1080/15575330.1971.10877452>
- Groeziinger, J., Boermans, T., John, A., Seehusen, J., Wehringer, F., & Scherberich, M. (2014). *Overview of Member States information on NZEBs Working version of the progress report - final report*. *Overview of Member States information on NZEBs Working version of the progress report - final report*.
- Hepbasli, A., & Kalinci, Y. (2009). A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 1211–1229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002>
- Hernandez, P., & Kenny, P. (2010). From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). *Energy and Buildings*, 42(6), 815–821. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.001>
- IEA. (2011). *Technology Roadmap: Geothermal Heat and Power*. Retrieved from [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Geothermal\\_Roadmap.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Geothermal_Roadmap.pdf)
- IEA. (2012a). *Technology Roadmap - Hydropower*. Retrieved from [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012\\_Hydropower\\_Roadmap.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012_Hydropower_Roadmap.pdf)
- IEA. (2012b). *Technology Roadmap - Solar Heating and Cooling*. Retrieved from [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar\\_Heating\\_Cooling\\_Roadmap\\_2012\\_WEB.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar_Heating_Cooling_Roadmap_2012_WEB.pdf)
- IEA. (2013). *Technology Roadmap: Wind Energy*. Retrieved from [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind\\_2013\\_Roadmap.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf)
- IEA. (2014a). *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*. Retrieved from <http://www.iea.org/termsandconditionsuseandcopyright/>
- IEA. (2014b). *Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy*. Retrieved from [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy\\_2014edition.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf)
- IEA. (2014c). *Technology Roadmap - Solar Thermal Electricity*. Retrieved from

- [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarThermalElectricity\\_2014edition.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarThermalElectricity_2014edition.pdf)
- IEA. (2017). *Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy*. Retrieved from [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology\\_Roadmap\\_Delivering\\_Sustainable\\_Bioenergy.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology_Roadmap_Delivering_Sustainable_Bioenergy.pdf)
- IEA. (2018). Solar Energy. Retrieved December 6, 2018, from <https://www.iea.org/topics/renewables/solar/>
- IEA Annex 75. (2018). Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables. Retrieved from [http://annex75.iea-ebc.org/Data/publications/EBC\\_Annex\\_75\\_Factsheet.pdf](http://annex75.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_75_Factsheet.pdf)
- INE. (2012). *Censos 2011 Resultados Definitivos - Portugal*.
- International Energy Agency. (2013). *Technology Roadmap - Energy Efficient Building Envelopes*. Retrieved from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyEfficientBuildingEnvelopes.pdf>
- ISO. (2017a). *Energy performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 2: Explanation and justification of ISO 52016-1 and ISO 52017-1*. Retrieved from <https://www.sis.se/api/document/preview/921999/>
- ISO. (2017b). ISO 10077-1:2017 - Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/67090.html>
- ITeCons. (2012). Estudo de mercado e inovação na área das tecnologias de construção sustentável.
- ITeCons. (2013). PE3 - Plataforma para a Eficiência Energética de Edifícios. Retrieved April 6, 2019, from <http://www.itecons.uc.pt/p3e/index.php>
- Jacinto, J. M. da S. (2014). *Metodologias de cálculo das necessidades de aquecimento na ISO 13790*. Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências. Retrieved from [http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/16099/1/ulfc112496\\_tm\\_Joana\\_Jacinto.pdf](http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/16099/1/ulfc112496_tm_Joana_Jacinto.pdf)
- Kavgic, M., Mavrogianni, A., Mumovic, D., Summerfield, A., Stevanovic, Z., & Djurovic-Petrovic, M. (2010). A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45(7), 1683–1697. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.021>
-



- Lanham, A., Gama, P., & Braz, R. (2004). *Arquitetura Bioclimática - Perspectivas de inovação e futuro*. Lisboa. Retrieved from [http://www.gsd.inesc-id.pt/~pgama/ab/Relatorio\\_Arq\\_Bioclimatica.pdf](http://www.gsd.inesc-id.pt/~pgama/ab/Relatorio_Arq_Bioclimatica.pdf)
- Laustsen, J. (2008). Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings. *International Energy Agency (IEA)*, (March), 1–85. <https://doi.org/10.1.1.378.1012>
- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 736–755. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>
- Mardiana, A., & Sb, R. (2015). Earth Science & Climatic Change Building Energy Consumption and Carbon dioxide Emissions: Threat to Climate Change, 1–3. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.S3-001>
- Martins, A. M. C. (2009). *Reabilitação Térmica e Energética de Vãos Envidraçados - As Atuais Exigências Regulamentares*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Retrieved from <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/57657/1/000136341.pdf>
- Ministério da Economia. (2016). Portaria n.º 319/2016 de 15 de dezembro. *Diário Da República*, 1.ª série(N.º 239), 4723–4725.
- Ministério da Economia e do Emprego. (2013a). Decreto-Lei n.º 118/2013. *Diário Da República*, 159, 4988–5005.
- Ministério da Economia e do Emprego. Decreto-Lei n.º 118/2013 (2013). Retrieved from <https://dre.pt/application/dir/pdf1s/2013/08/15900/0498805005.pdf>
- Ministério da Economia e do Emprego. (2013c). Despacho n.º 15793-K/2013. *Diário Da República*, 2.ª Série N.º 234, (3 de dezembro de 2013), 58–87.
- Ministério das Obras Públicas, T. e C. (1990). Decreto-Lei n.º 40/90 - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. *Diário Da República*. Retrieved from <https://dre.pt/application/conteudo/334611>
- Ministério do Ambiente, do O. do T. e do D. R. (2009). Decreto-Lei n.º 307/2009 de 23 de Outubro. *Diário Da República*, 7956–7975. Retrieved from [http://gestao-ambiental.dashofer.pt/library/6512bd43d9caa6e02c990b0a82652dca11/ext-data/DL\\_27-A-2006.pdf](http://gestao-ambiental.dashofer.pt/library/6512bd43d9caa6e02c990b0a82652dca11/ext-data/DL_27-A-2006.pdf)
- Ministério do Ambiente, O. do T. e E. (2013). Portaria n.º 349-B/2013. *Diário Da República*, 232(18),

18–29.

Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia. (2015). Portaria n.º 379-A/2015. *Diário Da República*, (1), 9196.

Morais, N. S. M. (2017). *Avaliação e melhoria do desempenho térmico na reabilitação de uma habitação familiar*. Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências. Retrieved from [http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/32666/1/ulfc124131\\_tm\\_Natacha\\_Morais.pdf](http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/32666/1/ulfc124131_tm_Natacha_Morais.pdf)

NOCTULA. (2016). Parque Eólico de Mirandela - Plano de Recuperação das Áreas Intervencionadas. Retrieved December 18, 2018, from <http://noctula.pt/parque-eolico-de-mirandela-plano-de-recuperacao-das-areas-intervencionadas-prai/>

Nunes, K., & Tirone, L. (2007). *Construção Sustentável - Soluções eficiente hoje, a nossa riqueza de amanhã*. (T. Nunes, Ed.).

Paiho, S., Abdurafikov, R., & Hoang, H. (2015). Cost analyses of energy-efficient renovations of a Moscow residential district. *Sustainable Cities and Society*, 14(1), 5–15. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.07.001>

Pinheiro, M. D. (2006). *Ambiente e Construção Sustentável*. Retrieved from [http://www.lidera.info/resources/ACS\\_Manuel\\_Pinheiro.pdf](http://www.lidera.info/resources/ACS_Manuel_Pinheiro.pdf)

Politéc. (2018). Como poupar energia com caldeiras de condensação. Retrieved December 9, 2018, from <https://politec.pt/caldeiras-de-condensacao/>

Portal Energia. (2016a). O que é a energia da Biomassa. Retrieved December 18, 2018, from <https://www.portal-energia.com/o-que-e-energia-biomassa/>

Portal Energia. (2016b). Vantagens, desvantagens e diferenças dos modelos de Painéis Solares Fotovoltaicos. Retrieved December 17, 2018, from <https://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-diferencas-dos-paineis-solares-fotovoltaicos/>

Santos, C. A. P. dos, & Matias, L. (2006). *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente de edifícios*. (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Ed.). Lisboa.

Silva, F. M. F. (2013). *Estudo de Materiais de Isolamento Térmico Inovadores*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. Retrieved from <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68641/2/26108.pdf>

Silva, J. C. (2012). *Reabilitação térmica de edifícios residenciais: propostas de intervenção*. Instituto

- Superior de Engenharia de Lisboa. Retrieved from <https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/2163/1/Dissertação.pdf>
- Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1819–1835. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2008.09.033>
- The Green Age. (2017). Introduction to biomass boilers. Retrieved December 9, 2018, from <https://www.thegreenage.co.uk/tech/biomass-boiler/>
- Thuesen, C. (2010). *Leveraging Economy of Scale across Construction Projects by Implementing Coordinated Purchasing*. Retrieved from <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB19144.pdf>
- Trilhos Energéticos. (2018). Inversores híbridos e inversores carregadores - diferenças. Retrieved December 17, 2018, from <http://trilhosenergeticos.pt/diferencas-inversores/>
- Tuominen, P., Holopainen, R., Eskola, L., Jokisalo, J., & Airaksinen, M. (2014). Calculation method and tool for assessing energy consumption in the building stock. *Building and Environment*, 75, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.02.001>
- U.S. Department of Energy. (2018). Heat Pump Systems. Retrieved December 9, 2018, from <https://www.energy.gov/energysaver/heat-and-cool/heat-pump-systems>
- UNCED. (1992). *Agenda 21*. Retrieved from <http://www.un.org/esa/sustdev/agenda21.htm>.
- UNDESA. (2017). Reflection on development policy in the 1970s and 1980s. Retrieved from <http://www.un.org/development/desa/dpad/>
- UNEP. (2011). *Towards a Green Economy Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication, PART II: Investing in energy and resource efficiency, Building* (Vol. 39). Retrieved from [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22004/9.0\\_buildings.pdf?amp%3BisAllowed=&sequence=1](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22004/9.0_buildings.pdf?amp%3BisAllowed=&sequence=1)
- United Nations. (1998). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change United Nations*. Kyoto. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- United Nations. (2002). *Report of the World Summit on Sustainable Development*. Johannesburg. Retrieved from <http://www.un-documents.net/aconf199-20.pdf>
- Viegas, J. C. (2010). *Ventilação Natural de Edifícios de Habitação*. (LNEC, Ed.) (12th–2010th ed.).

- Wang, D., Landolt, J., Mavromatidis, G., Orehounig, K., & Carmeliet, J. (2018). CESAR: A bottom-up building stock modelling tool for Switzerland to address sustainable energy transformation strategies. *Energy and Buildings*, 169, 9–26. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.020>
- Weber. (2018). Pormenores Construtivos - Weber. Retrieved December 16, 2018, from <https://www.weber.com.pt/isolamento-termico-pelo-exterior/conselhos-e-ajuda/pormenores-construtivos.html>
- Willoughby, J. (2003). Insulation. In D. Snow (Ed.), *Plant Engineer's Reference Book* (Segunda Ed). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4452-5.X5052-4>

# ANEXOS

## ANEXO I – TABELA DE COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS

Tabela 22 - Tabela resumo com comparação de metodologias através do tipo de abordagem implementado

Abordagem	Top down (A)			Bottom up (B)					
Tipo de modelo	A.1.] econométrico	A.2.1.] tecnológico	A.2.2.] tecnológico	B.1.1.] estatístico	B.1.2.] estatístico	B.2.1.] física	B.2.2.] física	B.2.3.] física	B.3.] híbrido
Metodologias (Ferramentas utilizadas)	estatística, economia (sem informação)	estatística, GIS, standards europeus - "heat gain utilization factor" (Ecotect Weather, ferramentas baseadas no GIS e E-SDOB)	dinâmica de sistemas, microeconomia (Vensim software)	REH, GIS, standards europeus, estatística, tipologia de construção, regressão linear múltipla robusta, (QGIS software, ArcView software, TABLE, KnaufTermPro2, ferramentas baseadas no GIS, TEE-KENAK, MS Excel, Visual Basic, MS Access e ArcGIS)	estatística, GIS (EnergyPlus e ferramentas baseadas no GIS)	estatística, GIS, standards europeus (ferramentas baseadas no GIS)	estatística, GIS, standards europeus, caracterização física (EnergyPlus, Combined Energy Simulation And Retrofitting (CESAR), ArcGIS, Meteororm, Design Builder, Google Earth, Streetview, Microsoft Bing Bird View, Digital Elevation Models, ferramentas baseadas no GIS, ESRI-ArcInfo software, IDA-ICE 4.2 e ferramenta de modelação baseada em MS Excel (REMA))	standards europeus, nZEB (Design Builder, EnergyPlus e programa de simulação EnergyPro)	algoritmia, GIS, estatística (MATLAB, Boxplot, Meteororm 7.0, ferramentas baseadas no GIS)
Tipo de edificação alvo	residencial	residencial	residencial	residencial e não residencial	residencial, comercial, públicos e monumentos	residencial e não residencial	residencial e comercial	residencial, comercial e industrial	residencial, comercial e industrial
Edifícios de referência	sem informação	edifícios com certificação energética fornecida pela ADENE e amostras de edifícios	arquétipos	amostras de edifícios, arquétipos, edifícios representativos, edifícios modelo, edifícios de referência e edifícios característicos chave	arquétipos e amostras de edifícios	edifícios de referência, arquétipos e amostras de edifícios	arquétipos e edifícios de referência	edifícios de referência e arquétipos	arquétipos e casos de estudo
Método de cálculo	dinâmico	simplificado	dinâmico	simplificado	dinâmico	simplificado	dinâmico	dinâmico	simplificado
Nível de desagregação - agregação	sem informação - nível nacional	nível do edifício até local - nível de bairro até distrital	nível do edifício - nível nacional	nível do edifício até local - nível de bairro até distrital	nível do edifício até de bairro - nível de cidade até distrital	nível do edifício - nível de cidade até nacional	nível do edifício até conjunto de edifícios - nível de bairro até nacional	nível do edifício - nível de bairro até distrital	nível do edifício de bairro - nível distrital e nacional
Resultado do modelo (uni)	Energia entregue por área útil de pavimento ( $\text{kWh/m}^2\text{ano}$ ), preços de energia ( $\text{€}/\text{kWh}$ ) e despesas de energia por gastos domésticos totais (%)	classe de eficiência energética (de G a A+) e utilização média específica de energia primária ( $\text{kWh/m}^2$ )	consumo de energia específico para a finalidade de aquecimento ( $\text{kWh/m}^2$ )	consumo de energia primária ( $\text{kWh/m}^2\text{ ano}$ ), necessidades de energia primária total (PJ/ano) e potencial de poupança de energia (0-100%), necessidades de energia térmica ( $\text{kWh/ano}$ ) e avaliação do nível de aptidão da instalação de sistemas de energia renovável solar, consumo de energia (Mtoe), necessidades de energia (Mtoe), energia primária (Mtoe) e emissões de CO <sub>2</sub> (Mt), intensidades de finalidades de energia ( $\text{kWh/m}^2$ ), necessidade de energia primária para aquecimento dos espaços e de águas sanitárias (MWh/ha), necessidade de energia primária para aquecimento dos espaços ( $\text{kWh/ano}$ ), média de utilização de energia ( $\text{kWh/metro}^2\text{ano}$ ) e média de intensidade de energia ( $\text{kWh/metro}^2\text{ano}$ )	consumo de energia final para cada uma das finalidades de energia ( $\text{kWh/m}^2\text{ ano}$ ), classes de energia (classes E, F e G para o inverno e classes II, III, IV e V para o verão) e necessidades de energia primária ( $\text{kWh/m}^2\text{ ano}$ )	consumo de energia primária global anual ( $\text{kWh/m}^2$ ), intensidade para a finalidade de aquecimento dos espaços ( $\text{kWh/m}^3$ ) e consumo para a finalidade de aquecimento dos espaços (TWh), desempenho energético ( $\text{kWh/m}^2$ ) e custo global ( $\text{€/m}^2$ )	necessidades de energia (GWh/ano), consumo de energia primária (TJ-eq/ano), classe de eficiência energética (de G a A+), índice global de desempenho energético ( $\text{kWh/m}^2\text{ ano}$ ), média anual das necessidades de energia térmica por metro quadrado de espaço interno, consumo de energia total do stock de edifícios (TWh/m <sup>2</sup> )	consumo de energia primária ( $\text{kWh/m}^2\text{ ano}$ ) e consumo de energia anual do bairro (kWh)	consumo anual (GWh/ano), consumo de energia primária ( $\text{kWh/m}^2\text{ ano}$ ) e emissões de gases com efeito de estufa ( $\text{kgCO}_2\text{ e.m}^{-2}\text{ano}^{-1}$ )

Finalidade do modelo	analisar as causas econômicas e organizacionais subjacentes à estagnação do aumento da eficiência energética no setor da construção	avaliar o desempenho energético de stocks de edifícios de grande escala e tornar disponível um processo mais integrado de planeamento	fornecer conhecimentos sobre os desafios sócio-técnicos na implementação de medidas de eficiência energética	determinação e avaliação do desempenho energético dos edifícios	caracterização e avaliação do desempenho energético e investigação de novas estratégias de melhoramento da eficiência energética dos edifícios	estimação do cálculo do desempenho energético de edifícios e apoiar na caracterização do stock de edifícios	avaliação do desempenho energético e necessidades de energia e desenvolvimento de estratégias de melhoramento do desempenho energético	aumentar o efeito das medidas de eficiência energética através do melhor entendimento do conceito de "edifício de necessidades quase nulas"	facilitar a avaliação de medidas potenciais de eficiência energética e desenvolver um índice de desempenho energético
Validação empírica	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Consideração de efeitos de reabilitação				x		x	x		
Exemplos	(Spri & Holmberg, 2008)	Poggi, F., Firmino, A., & Amado, M. (2017); Fracastoro, G. V., & Serraino, M. (2011)	Fazeli, R., & Davidsdottir, B. (2018)	Gouveia, J. P., Palma, P., Seixas, J., & Simões, S. (2017); Dall'ò, G., Galante, A., & Torri, M. (2012); Csoknyai, T., Hrabovszky-Horváth, S., Georgiev, Z., Jovanovic-Popovic, M., Stankovic, B., Villatoro, D., & Szendrő, G. (2016); Groppi, D., de Santoli, L., Cumo, F., & Garcia, D. A. (2018); Ascione, F., De Masi, R. F., de Rossi, F., Fiolata, R., Sasso, M., & Vanoli, G. P. (2013); Howard, B., Parshall, L., Thompson, J., Hammer, S., Dickinson, J., & Modi, V. (2012); Jakob, M., Wallbaum, H., Catenazzi, G., Martius, G., Nägeli, C., & Sunarjo, B. (2013); Mavroggianni, A., Davies, M., Kolokotroni, M., & Hamilton, I. (2009); Steadman, P., Hamilton, I., & Evans, S. (2014)	Caputo, P., Costa, G., & Ferrari, S. (2013); Ascione, F., De Masi, R. F., de Rossi, F., Fiolata, R., Sasso, M., & Vanoli, G. P. (2013)	Belussi, L., Danza, L., Ghellere, M., Guazzi, G., Meroni, I., & Salamone, F. (2017); Mutani, G., Delmastro, C., Gargiulo, M., & Corgnati, S. P. (2016); Corrado, V., Ballarini, I., & Paduos, S. (2014)	Wang, D., Landolt, J., Mavromatidis, G., Drehoung, K., & Carmeliet, J. (2018); Theodoridou, I., Papadopoulos, A. M., & Hegger, M. (2011); Belpoliti, V., Bizzarri, G., Boarin, P., Calzolari, M., & Davoli, P. (2018); Rode, P., Keim, C., Robazza, G., Viejo, P., & Keim, C. (2016); Tuominen, P., Holopainen, R., Eskola, L., Jokisalo, J., & Airaksinen, M. (2014)	Kalaycıoğlu, E., & Yılmaz, A. Z. (2017); Reiter, S. (2014)	Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2015); Moussaoui, F., Cherrared, M., Kacimi, M. A., & Belarbi, R. (2017)

## ANEXO II – NÍVEL DE RENTABILIDADE

### Anexo II.1 – Medidas de melhoria isoladas

*Tabela 23 – Nivel de rentabilidade das medidas de melhoria isoladas*

		Custo inicial global		Custos de exploração (30 anos)		Custos totais (30 anos)		Nic (kWh/m².ano)		Nvc (kWh/m².ano)		Nac (kWh/m².ano)		Fatores de conversão			Ntc (kWh/m².ano)	Redução face à base	annuity	emissões
		Private	Societal	Private	Societal	Private	Societal	Total	η	Total	η	Total	η	Nic	Nvc	Nac	Total	Total		
<b>Var REF</b>	<b>Manutenção</b>	18 006 €	15 480 €	22 898 €	27 059 €	526,94	548,01	71,1	1	2,0	3	35,82	0,713	3	3	1	265,42	0	38,28	41,13
<b>Var1</b>	Man+ETICS_EPS60mm+SistemasConvencional	19 413 €	16 624 €	17 622 €	20 531 €	477,09	478,65	48,5	1	2,1	3	35,82	0,713	3	3	1	197,83	25,47%	34,66	31,40
<b>Var2</b>	Man+ETICS_EPS90mm+SistemasConvencional	19 806 €	16 943 €	17 503 €	20 374 €	480,62	480,73	47,4	1	2,1	3	35,82	0,713	3	3	1	194,62	26,67%	34,92	30,94
<b>Var3</b>	Man+ETICS_EPS120mm+SistemasConvencional	20 227 €	17 286 €	17 431 €	20 276 €	485,13	483,89	46,6	1	2,1	3	35,82	0,713	3	3	1	192,29	27,55%	35,24	30,60
<b>Var4</b>	Man+ETICS_Lâmineral40mm+SistemasConvencional	19 707 €	16 863 €	17 801 €	20 758 €	483,19	484,64	49,5	1	2,1	3	35,82	0,713	3	3	1	200,79	24,35%	35,10	31,83
<b>Var5</b>	Man+ETICS_Lâmineral80mm+SistemasConvencional	20 687 €	17 660 €	17 644 €	20 543 €	493,80	492,15	47,7	1	2,1	3	35,82	0,713	3	3	1	195,55	26,32%	35,87	31,07
<b>Var6</b>	Man+ETICS_Lâmineral120mm+SistemasConvencional	21 725 €	18 504 €	17 592 €	20 518 €	506,49	502,70	46,6	1	2,1	3	35,82	0,713	3	3	1	192,29	27,55%	36,80	30,60
<b>Var7</b>	Man+ETICS_Cortixa40mm+SistemasConvencional	20 239 €	17 295 €	17 884 €	20 856 €	491,10	491,48	49,7	1	2,1	3	35,82	0,713	3	3	1	201,30	24,16%	35,68	31,90
<b>Var8</b>	Man+ETICS_Cortixa80mm+SistemasConvencional	21 596 €	18 399 €	17 762 €	20 683 €	507,03	503,46	47,9	1	2,1	3	35,82	0,713	3	3	1	195,97	26,17%	36,83	31,13
<b>Var9</b>	Man+ETICS_Cortixa120mm+SistemasConvencional	23 119 €	19 637 €	17 763 €	20 663 €	526,65	519,16	46,8	1	2,1	3	35,82	0,713	3	3	1	192,71	27,39%	38,26	30,66
<b>Var10</b>	Man+FV_EPS60mm+SistemasConvencional	19 692 €	16 851 €	18 174 €	21 165 €	487,81	489,74	48,5	1	1,3	3	35,82	0,713	3	3	1	196,91	25,81%	35,44	31,27
<b>Var11</b>	Man+FV_EPS90mm+SistemasConvencional	19 963 €	17 071 €	18 065 €	21 019 €	489,89	490,69	47,4	1	1,3	3	35,82	0,713	3	3	1	193,75	27,00%	35,59	30,81
<b>Var12</b>	Man+FV_EPS120mm+SistemasConvencional	20 235 €	17 292 €	18 005 €	20 936 €	492,62	492,46	46,6	1	1,4	3	35,82	0,713	3	3	1	191,48	27,86%	35,79	30,49
<b>Var13</b>	Man+FV_LâMineral40mm+SistemasConvencional	19 434 €	16 641 €	18 291 €	21 315 €	485,99	488,96	49,3	1	1,2	3	35,82	0,713	3	3	1	199,24	24,93%	35,31	31,60
<b>Var14</b>	Man+FV_LâMineral80mm+SistemasConvencional	19 615 €	16 788 €	18 079 €	21 038 €	485,58	487,28	47,5	1	1,3	3	35,82	0,713	3	3	1	194,04	26,89%	35,28	30,86
<b>Var15</b>	Man+FV_LâMineral120mm+SistemasConvencional	19 860 €	16 988 €	17 974 €	20 896 €	487,39	488,03	46,4	1	1,4	3	35,82	0,713	3	3	1	190,86	28,09%	35,41	30,40
<b>Var16</b>	Man+FV_Cortixa40mm+SistemasConvencional	20 544 €	17 544 €	18 301 €	21 332 €	500,41	500,81	49,6	1	1,2	3	35,82	0,713	3	3	1	200,16	24,59%	36,35	31,74
<b>Var17</b>	Man+FV_Cortixa90mm+SistemasConvencional	21 742 €	18 551 €	18 083 €	21 048 €	513,03	510,13	47,9	1	1,3	3	35,82	0,713	3	3	1	195,08	26,50%	37,27	31,01
<b>Var18</b>	Man+FV_Cortixa120mm+SistemasConvencional	23 127 €	19 643 €	17 957 €	20 880 €	529,25	522,04	46,7	1	1,3	3	35,82	0,713	3	3	1	191,59	27,82%	38,45	30,50
<b>Var19</b>	Man+PVC+SistemasConvencional	20 531 €	17 533 €	22 476 €	26 506 €	554,02	567,32	67,8	1	1,4	3	35,82	0,713	3	3	1	255,07	3,90%	40,25	39,64
<b>Var20</b>	Man+Aluminio+SistemasConvencional	20 218 €	17 279 €	22 884 €	27 015 €	555,25	570,61	69,8	1	1,3	3	35,82	0,713	3	3	1	261,03	1,65%	40,34	40,50
<b>Var21</b>	Man+Madeira+SistemasConvencional	22 647 €	19 253 €	23 990 €	28 264 €	600,79	612,13	68,1	1	1,4	3	35,82	0,713	3	3	1	255,85	3,61%	43,65	39,76



## Anexo II.2 – Pacotes de reabilitação (tipologia representativa)

Tabela 24 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação (tipologia representativa)

		Custo inicial global		Custos de exploração (30 anos)		Custos totais (30 anos)		Nic (kWh/m².ano)		Nvc (kWh/m².ano)		Nac (kWh/m².ano)		Fatores de conversão			Ntc (kWh/m².ano)	Renováveis			Redução face à base	annuity	emissões
		Private	Societal	Private	Societal	Private	Societal	Total	η	Total	η	Total	η	Nic	Nvc	Nac	Total	TS	FV	BM	Total		
Var REF	Manutenção	18 006 €	15 480 €	22 898 €	27 059 €	526,94	548,01	71,1	1	2,0	3	35,82	0,713	3	3	1	265,42	0,00	0,00	0,00	0	38,28	41,13
P1 + Sconv	Man+ETICS_Lâmineral120mm+PVC+SistemasConvencional	22 858 €	19 425 €	17 934 €	20 786 €	525,50	518,01	43,2	1	0,8	3	35,82	0,713	3	3	1	180,57	0,00	0,00	0,00	31,97%	38,18	28,92
P2 + Sconv	Man+ETICS_EPS60mm+PVC+SistemasConvencional	22 411 €	19 062 €	17 574 €	20 411 €	515,10	508,50	45,2	1	1,4	3	35,82	0,713	3	3	1	187,39	0,00	0,00	0,00	29,40%	37,42	29,90
P3 + Sconv	Man+ETICS_EPS120mm+PVC+SistemasConvencional	23 225 €	19 723 €	17 384 €	20 158 €	523,15	513,76	43,4	1	1,4	3	35,82	0,713	3	3	1	181,87	0,00	0,00	0,00	31,48%	38,01	29,10
P4 + Sconv	Man+ETICS_EPS90mm+Alumínio+SistemasConvencional	22 491 €	19 127 €	17 861 €	20 760 €	519,83	513,83	46,2	1	1,3	3	35,82	0,713	3	3	1	190,10	0,00	0,00	0,00	28,38%	37,76	30,29
P1 + S1	Man+ETICS_Lâmineral120mm+PVC+Sistemas1	22 916 €	19 368 €	18 036 €	19 499 €	527,56	500,70	43,2	0,927	0,8	4	35,82	0,85	1	3	1	89,33	0,00	0,00	0,00	66,35%	38,33	15,25
P2 + S1	Man+ETICS_EPS60mm+PVC+Sistemas1	22 469 €	19 005 €	17 693 €	19 070 €	517,38	490,49	45,2	0,927	1,4	4	35,82	0,85	1	3	1	92,02	0,00	0,00	0,00	65,33%	37,59	15,59
P3 + S1	Man+ETICS_EPS120mm+PVC+Sistemas1	23 283 €	19 667 €	17 482 €	18 856 €	525,14	496,26	43,4	0,927	1,4	4	35,82	0,85	1	3	1	90,03	0,00	0,00	0,00	66,08%	38,15	15,31
P4 + S1	Man+ETICS_EPS90mm+Aluminio+Sistemas1	22 549 €	19 070 €	17 993 €	19 400 €	522,27	495,58	46,2	0,927	1,3	4	35,82	0,85	1	3	1	92,94	0,00	0,00	0,00	64,99%	37,94	15,73
P1 + S2	Man+ETICS_Lâmineral120mm+PVC+Sistemas2	26 381 €	22 468 €	13 055 €	17 162 €	508,02	510,53	43,2	0,9	0,8	4	35,82	0,9	1	3	1	0,61	0,00	0,00	87,77	99,77%	36,91	14,98
P2 + S2	Man+ETICS_EPS60mm+PVC+Sistemas2	25 934 €	22 105 €	12 572 €	16 660 €	496,04	499,37	45,2	0,9	1,4	4	35,82	0,9	1	3	1	1,07	0,00	0,00	90,07	99,60%	36,04	15,33
P3 + S2	Man+ETICS_EPS120mm+PVC+Sistemas2	26 748 €	22 766 €	12 485 €	16 511 €	505,40	505,98	43,4	0,9	1,4	4	35,82	0,9	1	3	1	1,07	0,00	0,00	88,02	99,60%	36,72	15,04
P4 + S2	Man+ETICS_EPS90mm+Aluminio+Sistemas2	26 014 €	22 170 €	12 808 €	16 957 €	500,11	504,04	46,2	0,9	1,3	4	35,82	0,9	1	3	1	0,97	0,00	0,00	91,12	99,64%	36,33	15,48
P1 + S3	Man+ETICS_Lâmineral120mm+PVC+Sistemas3	25 885 €	21 948 €	11 482 €	13 739 €	481,37	459,73	43,2	3,33	0,8	2,68	35,82	3,33	3	3	3	72,08	0,00	0,00	0,00	72,84%	34,97	12,25
P2 + S3	Man+ETICS_EPS60mm+PVC+Sistemas3	25 439 €	21 585 €	10 908 €	13 091 €	468,22	446,70	45,2	3,33	1,4	2,68	35,82	3,33	3	3	3	74,63	0,00	0,00	0,00	71,88%	34,02	12,62
P3 + S3	Man+ETICS_EPS120mm+PVC+Sistemas3	26 252 €	22 246 €	10 912 €	13 085 €	478,76	455,15	43,4	3,33	1,4	2,68	35,82	3,33	3	3	3	72,97	0,00	0,00	0,00	72,51%	34,78	12,38
P4 + S3	Man+ETICS_EPS90mm+Aluminio+Sistemas4	25 518 €	21 650 €	11 094 €	13 310 €	471,65	450,37	46,2	3,33	1,3	2,68	35,82	3,33	3	3	3	75,33	0,00	0,00	0,00	71,62%	34,26	12,72
P1 + S4	Man+ETICS_Lâmineral120mm+PVC+Sistemas4	29 431 €	25 222 €	8 498 €	9 343 €	488,61	445,27	43,2	4,1	0,8	3,5	35,82	1,5	3	3	1	33,21	18,15	10,86	0,00	87,49%	35,50	9,47
P2 + S4	Man+ETICS_EPS60mm+PVC+Sistemas4	28 984 €	24 858 €	7 784 €	8 509 €	473,66	429,84	45,2	4,1	1,4	3,5	35,82	1,5	3	3	1	34,54	18,15	11,57	0,00	86,99%	34,41	9,77
P3 + S4	Man+ETICS_EPS120mm+PVC+Sistemas4	29 798 €	25 520 €	7 889 €	8 637 €	485,49	440,02	43,4	4,1	1,4	3,5	35,82	1,5	3	3	1	33,72	18,15	11,04	0,00	87,29%	35,27	9,57
P3 + S4	Man+ETICS_EPS90mm+Aluminio+Sistemas4	29 064 €	24 923 €	7 935 €	8 682 €	476,64	432,91	46,2	4,1	1,3	3,5	35,82	1,5	3	3	1	34,93	18,16	11,75	0,00	86,84%	34,63	9,85

## Anexo II.3 - Pacotes de reabilitação (grupo de edifícios)

Tabela 25 - Nível de rentabilidade dos pacotes de reabilitação (grupo de edifícios)

		Custo inicial global		Custos de exploração (30 anos)		Custos totais (30 anos)		Ntc (kWh/m².ano)		Nvc (kWh/m².ano)		Nac (kWh/m².ano)		Fatores de conversão			Ntc (kWh/m².ano)		Renováveis			Redução face à base	annuity	emissões
		Private	Societal	Private	Societal	Private	Societal	Total	η	Total	η	Total	η	Nic	Nvc	Nac	Total	TS	FV	BM	Total			
Var REF	Manutenção	2 048 219 €	1 842 714 €	4 075 911 €	4 816 574 €	443,22	481,95	71,1	1	2,0	3	35,82	0,713	3	3	1	265,42	0,00	0,00	0,00	0		32,20	41,13
P1 + Sconv	Man+ETICS_Lâmineral120mm+PVC+SistemasConvencional	2 712 168 €	2 382 510 €	3 192 235 €	3 699 873 €	427,32	440,20	43,2	1	0,8	3	35,82	0,713	3	3	1	180,57	0,00	0,00	0,00	31,97%		31,04	28,92
P2 + Sconv	Man+ETICS_EPS60mm+PVC+SistemasConvencional	2 675 577 €	2 352 761 €	3 128 140 €	3 633 202 €	420,03	433,22	45,2	1	1,4	3	35,82	0,713	3	3	1	187,39	0,00	0,00	0,00	29,40%		30,51	29,90
P3 + Sconv	Man+ETICS_EPS120mm+PVC+SistemasConvencional	2 800 163 €	2 454 050 €	3 094 429 €	3 588 081 €	426,61	437,28	43,4	1	1,4	3	35,82	0,713	3	3	1	181,87	0,00	0,00	0,00	31,48%		30,99	29,10
P4 + Sconv	Man+ETICS_EPS90mm+Alumínio+SistemasConvencional	2 687 816 €	2 362 711 €	3 179 180 €	3 695 282 €	424,61	438,43	46,2	1	1,3	3	35,82	0,713	3	3	1	190,10	0,00	0,00	0,00	28,38%		30,85	30,29
P1 + S1	Man+ETICS_Lâmineral120mm+PVC+Sistemas1	3 223 338 €	2 816 450 €	3 095 006 €	3 333 416 €	457,27	445,08	43,2	0,93	0,8	3,43	35,82	0,82	1	3	1	90,82	0,00	0,00	0,00	65,78%		33,22	15,54
P2 + S1	Man+ETICS_EPS60mm+PVC+Sistemas1	3 186 747 €	2 786 701 €	3 034 394 €	3 257 650 €	450,24	437,44	45,2	0,93	1,4	3,43	35,82	0,82	1	3	1	93,58	0,00	0,00	0,00	64,74%		32,71	15,89
P3 + S1	Man+ETICS_EPS120mm+PVC+Sistemas1	3 311 333 €	2 887 990 €	2 996 982 €	3 219 837 €	456,55	442,04	43,4	0,93	1,4	3,43	35,82	0,82	1	3	1	91,60	0,00	0,00	0,00	65,49%		33,17	15,60
P4 + S1	Man+ETICS_EPS90mm+Alumínio+Sistemas1	3 198 985 €	2 796 651 €	3 087 502 €	3 316 158 €	454,97	442,40	46,2	0,93	1,3	3,43	35,82	0,82	1	3	1	94,48	0,00	0,00	0,00	64,40%		33,05	16,03
P1 + S2	Man+ETICS_Lâmineral120mm+PVC+Sistemas2	3 271 294 €	2 859 352 €	2 028 171 €	2 712 798 €	383,53	403,27	43,2	0,9	0,8	3,43	35,82	0,9	1	3	1	0,72	0,00	0,00	87,77	99,73%		27,86	14,98
P2 + S2	Man+ETICS_EPS60mm+PVC+Sistemas2	3 234 703 €	2 829 603 €	1 942 939 €	2 624 254 €	374,72	394,71	45,2	0,9	1,4	3,43	35,82	0,9	1	3	1	1,25	0,00	0,00	90,07	99,53%		27,22	15,34
P3 + S2	Man+ETICS_EPS120mm+PVC+Sistemas2	3 359 289 €	2 930 892 €	1 927 412 €	2 597 799 €	382,61	400,12	43,4	0,9	1,4	3,43	35,82	0,9	1	3	1	1,25	0,00	0,00	88,02	99,53%		27,80	15,04
P4 + S2	Man+ETICS_EPS90mm+Alumínio+Sistemas2	3 246 942 €	2 839 553 €	1 984 747 €	2 676 898 €	378,63	399,24	46,2	0,9	1,3	3,43	35,82	0,9	1	3	1	1,13	0,00	0,00	91,12	99,57%		27,51	15,48
P1 + S3	Man+ETICS_Lâmineral120mm+PVC+Sistemas3	2 252 285 €	1 927 968 €	1 169 066 €	1 423 873 €	247,61	242,58	43,2	3,76	0,8	3,09	35,82	3,76	3	3	3	63,82	0,00	0,00	0,00	75,95%		17,99	10,85
P2 + S3	Man+ETICS_EPS60mm+PVC+Sistemas3	2 215 694 €	1 898 219 €	1 064 200 €	1 304 948 €	237,37	231,82	45,2	3,76	1,4	3,09	35,82	3,76	3	3	3	66,06	0,00	0,00	0,00	75,11%		17,24	11,17
P3 + S3	Man+ETICS_EPS120mm+PVC+Sistemas3	2 340 280 €	1 999 508 €	1 066 590 €	1 306 095 €	246,56	239,23	43,4	3,76	1,4	3,09	35,82	3,76	3	3	3	64,60	0,00	0,00	0,00	75,66%		17,91	10,96
P4 + S3	Man+ETICS_EPS90mm+Alumínio+Sistemas3	2 227 933 €	1 908 169 €	1 096 637 €	1 343 187 €	240,61	235,31	46,2	3,76	1,3	3,09	35,82	3,76	3	3	3	66,69	0,00	0,00	0,00	74,88%		17,48	11,26
P1 + S4	Man+ETICS_Lâmineral120mm+PVC+Sistemas4	3 517 591 €	3 084 638 €	1 220 859 €	1 325 214 €	342,93	319,15	43,2	4,03	0,8	3,43	35,82	1,5	3	3	1	31,81	20,89	11,00	0,00	88,02%		24,91	9,55
P2 + S4	Man+ETICS_EPS60mm+PVC+Sistemas4	3 481 000 €	3 054 889 €	1 095 839 €	1 179 334 €	331,24	306,44	45,2	4,03	1,4	3,43	35,82	1,5	3	3	1	33,23	20,89	11,65	0,00	87,48%		24,06	9,85
P3 + S4	Man+ETICS_EPS120mm+PVC+Sistemas4	3 605 586 €	3 156 178 €	1 111 535 €	1 198 284 €	341,39	315,14	43,4	4,03	1,4	3,43	35,82	1,5	3	3	1	32,29	20,89	11,22	0,00	87,83%		24,80	9,66
P3 + S4	Man+ETICS_EPS90mm+Alumínio+Sistemas4	3 493 239 €	3 064 839 €	1 121 730 €	1 208 806 €	334,00	309,29	46,2	4,03	1,3	3,43	35,82	1,5	3	3	1	33,60	20,89	11,87	0,00	87,34%		24,26	9,94